



Miguel Araújo Machado

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

**Conceção, Simulação e Validação
Experimental de Sondas de Correntes
Induzidas para Ensaaios Não Destrutivos
de Geometrias Tubulares**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Telmo Jorge Gomes dos Santos,
Professor Doutor, FCT

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Jorge Joaquim Pamies Teixeira
Vogais: Prof. Doutora Rosa Maria Mendes Miranda
Prof. Doutor Nuno Miguel Carvalho Pedrosa
Prof. Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro 2014

Conceção, Simulação e Validação Experimental de Sondas de Correntes Induzidas para Ensaios Não Destrutivos de Geometrias Tubulares

Copyright © 2014 Miguel Araújo Machado

Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, o meu profundo agradecimento. Em especial:

Ao Professor Telmo Santos: pela disponibilidade ao longo deste trabalho; pelo seu empenho nos esclarecimentos de dúvidas; pelo entusiasmo e preocupação demonstrada; pelas críticas, correções e sugestões; e pela valiosa transmissão de conhecimentos.

Ao Eng.º Luís Rosado e Eng.º Diogo Aguiar pela ajuda nas inspeções preliminares.

Ao Eng.º Luís Rosado pela preciosa ajuda nas simulações numéricas e pela disponibilidade demonstrada para tirar dúvidas sobre as mesmas.

Ao Prof. Nuno Pedrosa e ao ISQ por terem estado na origem deste desafio.

Ao INESC, Aalto University e à GLEXYZ pelo apoio nas simulações.

À Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT – MEC), pelo suporte financeiro concedido no âmbito do projeto INSPECT (PTDC/EEI-PRO/3219/2012).

Ao Sr. António Campos e ao Sr. Paulo Magalhães pela ajuda prestada durante a realização do protótipo funcional e pelos ensinamentos partilhados em especial nas operações de maquinaria.

Ao Eng.º Patrick Inácio e ao Eng.º Gonçalo Sorger pelos conhecimentos e ajuda indispensável ao longo da realização deste trabalho.

Aos meus colegas do laboratório de ensaios não destrutivos por partilharam comigo as suas ideias, experiências, opiniões e dificuldades. Ao Alexandre Costa, agradeço em especial a constante ajuda, disponibilidade e companheirismo.

À Mariana pelo amor e amizade demonstrado sempre que tem oportunidade dando-me força e motivação para enfrentar novos desafios.

Aos meus amigos um profundo obrigado por todos os momentos de distração e apoio.

Aos meus familiares, pela constante amizade e apoio, que à sua maneira também contribuíram decisivamente para a realização deste trabalho. À minha prima Inês pela ajuda e amizade em especial durante a realização do trabalho em que se encontrava em igualdade de circunstâncias.

Aos meus pais por todo o apoio e preocupação diária, pelo incentivo perante os desafios a fazer mais e melhor, e pela paciência.

RESUMO

Os Ensaios Não destrutivos de (END) por Correntes Induzidas (CI) são uma das principais técnicas utilizadas na inspeção de tubagens, nomeadamente em caldeiras e permutadores de calor. Apesar de ser uma técnica comum e com muitos anos de experiência acumulada, existem algumas condições onde persistem dificuldades, como é o caso da deteção de micro defeitos com orientação tangencial. Por outro lado, assiste-se atualmente a uma exigência cada vez maior do ponto de vista da fiabilidade dos sistemas e sondas de CI. Um exemplo particular dessa exigência é a inspeção de um perfil com geometria tubular em aço inox 316LN (JK2LB), o qual constitui as bobinas poloidais do *International Thermonuclear Experimental Reactor* (ITER).

O objetivo central deste trabalho foi desenvolver e validar experimentalmente diferentes tipos de sondas de CI para a deteção de micro defeitos no interior de componentes de geometria tubular, com vista a reduzir o limiar de detetabilidade dos defeitos com orientação tangencial, e assim aumentar a fiabilidade de inspeção.

Foram concebidas, produzidas e validadas experimentalmente quatro novas sondas de CI e foram replicadas três configurações já existentes. Foram realizadas simulações numéricas das diferentes sondas, sob diferentes condições de inspeção e criaram-se os meios laboratoriais adequados para a realização dos END.

Os resultados experimentais mostraram que as novas sondas desenvolvidas permitem detetar com clareza defeitos tangenciais com 2 mm de comprimento e 0.5 mm de profundidade, o que está claramente abaixo do limiar de detetabilidade das sondas convencionais constituídas por bobinas toroidais. As simulações numéricas permitiram descrever e caracterizar com sucesso alguns fenómenos elétricos e magnéticos envolvidos no funcionamento das sondas. Em termos genéricos, foi estabelecido um importante conhecimento processual dos END por CI de geometrias tubulares.

PALAVRAS-CHAVE

Ensaios Não Destrutivos (END), Correntes Induzidas (CI), Sondas, Geometria Tubular

ABSTRACT

Non-destructive Testing (NDT) by Eddy Currents (EC) is one of the main methods used to inspect pipes, especially in boilers and heat exchangers. Although a common technique, with many years of added experience, some difficulties remain, such as the detection of micro-defects with circumferential orientation. On the other hand, there is currently a growing demand on system and EC probes reliability. A particular example of this requirement is the inspection of a tubular geometry profile in a 316LN (JK2LB) stainless steel, which constitutes the poloidal coils of the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER).

The main objective of this study was to develop and experimentally validate different types of EC probes to detect micro-defects inside components of tubular geometry, in order to reduce the detectability threshold of defects with circumferential orientation, and thus increase the reliability of the inspection.

Four new EC probes were designed, produced and experimentally validated and three existing configurations were replicated. Numerical simulations of the probes were performed, under different inspection settings, and suitable laboratory means were created to perform the NDT.

Experimental results revealed that the new probes designed allow the clear detection of 2 mm long and 0.5 mm in depth circumferential defects, which is well below the detectability threshold of the conventional probes comprised of toroidal coils. Numerical simulations allowed a successful characterization of some electrical and magnetic phenomena involved in the probes operation. In general terms, an important procedural knowledge of NDT by EC in tubular geometries was established.

KEY-WORDS

Non-Destructive Testing (NDT), Eddy Currents (EC), Probes, Tubular Geometry

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vii
PALAVRAS-CHAVE	vii
ABSTRACT	ix
KEY-WORDS.....	ix
ÍNDICE.....	xi
LISTA DE FIGURAS	xv
LISTA DE TABELAS	xxi
NOMENCLATURA	xxiii
1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – Estado da Arte e Motivação	1
1.2 – Objetivo	3
1.3 – Metodologia	4
1.4 – Estrutura da Dissertação	4
2 – REVISÃO DO ESTADO DA ARTE.....	7
2.1 – Introdução	7
2.2 – Ensaios Não Destrutivos	7
2.3 – Correntes Induzidas (CI)	8
2.4 – Tipos de Sonda	12
2.4.1 – Sondas absolutas (apenas uma bobina)	12
2.4.2 – Sondas do tipo <i>bridge</i>	13
2.4.3 – Sonda do tipo reflexão.....	13
2.4.4 – Comparação entre sondas tipo Bridge e sondas tipo Reflexão	14
2.4.5 – Sondas em Absoluto, <i>Bridge</i> e Diferencial.....	14
2.5 – Inspeção de Tubos por Correntes Induzidas	15
2.5.1 – Sondas com Bobinas Inclinadas	17
2.5.2 – Sondas IONic	19
2.5.3 – Remote-Field Eddy Currents (RFEC)	24
2.5.4 – Rotating Field Eddy Current (RoFEC)	27
2.6 – Sondas Comerciais.....	29
2.7 – Síntese do Capítulo.....	31
3 – REQUISITOS, CONCEÇÃO E PRODUÇÃO DAS SONDAS DE CORRENTES INDUZIDAS	33
3.1 – Introdução	33
3.2 – Análise da Especificidade dos END para o Tubo do ITER.....	33
3.3 – Requisitos Funcionais da Sonda	36
3.4 – Desenvolvimento Conceptual da Sonda.....	37
3.4.1 – Configuração 1 – Sonda do Tipo Convencional	37

3.4.2 – Configuração 2 – Sonda com Três Bobinas Tangenciais	38
3.4.3 – Configuração 3 – Excitação axial com leitura em bobinas espirais trapezoidais planas.....	38
3.4.4 – Configuração 4 – Excitação tangencial com leitura em bobinas espirais trapezoidais	39
3.4.5 – Configuração 5 – Excitação e leitura com bobinas espirais trapezoidais planas.....	40
3.4.6 – Configuração 6 – Excitação e leitura com bobinas espirais circular planas.....	40
3.4.7 – Configuração 7 – Excitação helicoidal com leitura em bobinas espirais trapezoidais	40
3.4.8 – Síntese.....	41
3.5 – Projeto, Produção e Caracterização das Sondas	42
3.5.1 – Configuração 1 – Convencional	45
3.5.2 – Configuração 2 – Sonda com Três Bobinas Tangenciais	46
3.5.3 – Configuração 3 – Excitação axial com leitura em bobinas espiral trapezoidais ..	46
3.5.4 – Configuração 4 – Excitação tangencial com leitura em bobinas espirais trapezoidais	47
3.5.5 – Configuração 5 e 6 – Excitação e leitura com bobinas espirais	48
3.5.6 – Configuração 7 – Excitação helicoidal com leitura em bobinas espiral trapezoidais	49
3.6 – Suporte e Montagem das Sondas.....	50
3.7 – Síntese do Capítulo.....	50
4 – SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	51
4.1 – Introdução	51
4.2 – Aspectos comuns às diferentes configurações	51
4.3 – Excitação axial com leitura em bobina espiral trapezoidal – Configuração 3	52
4.3.1 – Modelo.....	52
4.3.2 – Estratégia de Simulação.....	54
4.3.3 – Resultado da Simulação.....	55
4.4 – Excitação tangencial e leitura em bobina espiral trapezoidal – Configuração 4.....	58
4.4.1 – Modelo.....	58
4.4.2 – Resultado da Simulação.....	60
4.5 – Excitação e leitura em bobina espiral trapezoidal – Configuração 5	63
4.5.1 – Modelo.....	63
4.5.2 – Resultado da Simulação.....	63
4.6 – Excitação helicoidal com leitura em bobina espiral trapezoidal – Configuração 7	65
4.6.1 – Modelo.....	65
4.6.1.1 – Resultado da Simulação.....	66
4.7 – Síntese do Capítulo.....	70
5 – DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO PARA INSPEÇÃO	71
5.1 – Introdução	71

5.2	– Requisitos Funcionais	71
5.3	– Conceção, Projeto e Produção do Equipamento.....	73
5.3.1	– Construção Mecânica	73
5.3.2	– Controlo e Instrumentação.....	76
5.3.3	– Software.....	76
5.4	– Detalhe Final da Mesa de Ensaios	77
5.5	– Síntese do Capítulo.....	81
6	– VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL.....	83
6.1	– Introdução	83
6.2	– Aparato Laboratorial	83
6.3	– Avaliação de Sonda Comercial.....	85
6.3.1	– Caracterização	85
6.3.2	– Ensaios	88
6.4	– Validação da Configuração 1 – Sonda Convencional.....	90
6.4.1	– Resultados dos ensaios ao tubo do ITER	91
6.4.2	– Resultados dos ensaios ao tubo de aço ST 52	93
6.5	– Validação da Configuração 2 – Sonda com três bobinas tangenciais	93
6.5.1	– Resultados dos ensaios ao tubo do ITER	93
6.5.2	– Resultados dos ensaios ao tubo de aço ST 52	95
6.6	– Validação da Configuração 3 – Excitação axial com leitura em bobinas espirais trapezoidais planas	95
6.6.1	– Resultados dos ensaios ao tubo do ITER	96
6.6.2	– Resultados dos ensaios ao tubo de aço ST 52	99
6.7	– Validação da Configuração 4 – Excitação tangencial com leitura em bobinas espirais trapezoidais	100
6.7.1	– Resultados dos ensaios ao tubo do ITER	100
6.7.2	– Resultados dos ensaios ao tubo de aço ST 52	104
6.8	– Validação da Configuração 5 – Excitação e leitura com bobinas espirais trapezoidais planas	105
6.8.1	– Resultados dos ensaios ao tubo do ITER	105
6.8.2	– Resultados dos ensaios ao tubo de aço ST 52	108
6.9	– Validação da Configuração 6 – Excitação e leitura com bobinas espirais circular	108
6.9.1	– Resultados dos ensaios ao tubo do ITER	109
6.9.2	– Resultados dos ensaios ao tubo de aço ST 52	111
6.10	– Validação da Configuração 7 – Excitação helicoidal com leitura em bobinas espirais trapezoidais planas.....	111
6.10.1	– Resultados dos ensaios ao tubo do ITER	112
6.10.2	– Resultados dos ensaios ao tubo de aço ST 52	114
6.11	– Síntese do Capítulo.....	114
7	– CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	119
7.1	– Introdução	119

7.2 – Conclusões.....	120
7.3 – Propostas para Desenvolvimentos Futuros.....	121
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123
ANEXOS	127
Anexo 1 – Exemplo de macro da simulação do conceito 3.....	128
Anexo 2 – Caracterização das sondas em substrato flexível	136
Anexo 3 – Caracterização da sonda convencional.....	138
Anexo 4 – Caracterização da sonda de três enrolamentos.....	140
Anexo 5 – Caracterização da excitação axial – Configuração 3	142
Anexo 6 – Caracterização da excitação tangencial – Configuração 4	142
Anexo 7 – Resultados ensaios sonda comercial.....	145
Anexo 8 – Resultado ensaio com sonda convencional	153
Anexo 9 – Resultado sonda três enrolamentos	168
Anexo 10 – Resultados ensaios sonda trapezoidal vAx2x8 com excitação 8 enrolamentos axiais.....	173
Anexo 11 – Resultados ensaios sonda trapezoidal vAx2x8 com excitação de 15 enrolamentos.....	180
Anexo 12 – Resultados ensaios sonda trapezoidal vAx4 com excitação de 80 enrolamentos.....	187
Anexo 13 – Resultados ensaios sonda trapezoidal vAx16 com excitação de 10 + 10 + 20 enrolamentos tangenciais	189
Anexo 14 – Resultados ensaios sonda trapezoidal vAx2x8 com excitação e leitura	190
Anexo 15 – Resultados ensaios sonda espirais circulares com excitação e leitura	193
Anexo 16 – Resultados ensaios sonda trapezoidal vAx2x8 com excitação helicoidal 15 enrolamentos.....	198

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Componente de geometria tubular alvo de estudo.	2
Figura 1.2 – Ilustração com os principais constituintes do ITER [2].	2
Figura 2.1 - Campos magnéticos e correntes geradas pela sonda de CI [13].	9
Figura 2.2 – Plano resposta de impedâncias das CI [12].	9
Figura 2.3 – Desvios causados pelos defeitos nas correntes induzidas [8].	10
Figura 2.4 - Representação qualitativa da intensidade e localização	11
Figura 2.5 – Representação esquemática do modo de operação de uma sonda absoluta [20].	12
Figura 2.6 – Representação esquemática do modo de operação de uma sonda	13
Figura 2.7 – Representação esquemática do modo de operação de uma sonda	13
Figura 2.8 – Representação esquemática do modo de operação de uma sonda <i>bridge</i> diferencial [20].	15
Figura 2.9 – Representação esquemática do modo de operação de uma sonda reflexão diferencial [20].	15
Figura 2.10 – Comparação do sinal gerado por uma sonda absoluta e uma sonda diferencial [25].	16
Figura 2.11 – Exemplo de uma sonda convencional para inspeção de interior de tubos [20]. ..	17
Figura 2.12 - Sonda com as bobinas inclinadas [27].	17
Figura 2.13 – Sondas de bobina inclinada, a) Paralela, b) Simétrica, c) Torcida [27].	18
Figura 2.14 – Relação entre bobinas e defeitos.	18
Figura 2.15 – Duas sondas de bobinas inclinadas com diferentes ângulos de inclinação.	18
Figura 2.16 – Alguns dos estádios da sonda IOnic [28].	20
Figura 2.17 - Representação esquemática das correntes (I) e dos campos magnéticos	21
Figura 2.18 – Representação dos campos magnéticos e respectivas correntes induzidas	22
Figura 2.19 – Circulação das CI em defeitos superficiais:	23
Figura 2.20 - Representação esquemática do método de inspeção	23
Figura 2.21 – Localização da <i>remote-field zone</i> em relação à bobina de excitação [30].	24
Figura 2.22 – Configuração com bobina de excitação e várias bobinas de receção [30].	25
Figura 2.23 – Princípio de funcionamento da <i>Pulsed Remote Field Eddy Current</i> [33].	26

Figura 2.24 – <i>Rotating field eddy current</i> : a) Arranjo trifásico dos enrolamentos e b) Modelo 3D dos três enrolamentos de excitação e da bobina sensível [39].	27
Figura 2.25 – CI na parede do tubo devido à rotação do campo magnético [39].	28
Figura 2.26 - Contorno do campo de indução magnética no plano xy:	28
Figura 2.27 – Sonda Olympus TXE [20].	29
Figura 2.28 – Modelo esquemático da sonda TXE [20].	29
Figura 2.29 – Representação C-scan dos resultados [20].	30
Figura 2.30 – Sonda DefHi – Eddyfi [40].	30
Figura 2.31 – Representação do campo magnético e CI por uma bobina [40].	31
Figura 2.32 – Visualização de resultados [40].	31
Figura 3.1 – Tubo do ITER a) Vista de perfil b) Vista isométrica.	34
Figura 3.2 – 1ª Configuração – Convencional.	37
Figura 3.3 – 2ª Configuração – Três bobinas tangenciais.	38
Figura 3.4 – 3ª Configuração – Excitação axial com leitura trapezoidal.	39
Figura 3.5 – 4ª Configuração – Excitação tangencial e leitura trapezoidal.	39
Figura 3.6 – 5ª Configuração – Excitação e leitura em espiral trapezoidal.	40
Figura 3.7 – 6ª Configuração – Excitação e leitura em espiral circular.	40
Figura 3.8 – 7ª Configuração – Excitação helicoidal e leitura espiral trapezoidal.	41
Figura 3.9 – 7ª Configuração com rotação de 90°.	41
Figura 3.10 – Sonda criada no <i>software</i> Altium Design.	43
Figura 3.11 – Varrimento em frequência de 5 bobinas da sonda trapezoidal vAx2x8	44
Figura 3.12 – a) 1ª Configuração sonda convencional; b) Varrimento em frequência das bobinas no interior do tubo do ITER.	45
Figura 3.13 – 2ª Configuração – a) Vista de pormenor dos enrolamentos b) Vista geral.	46
Figura 3.14 – a) Pormenor do chassis da 3ª configuração b) 3ª configuração – Excitação	46
Figura 3.15 – 4ª Configuração – Excitação tangencial com leitura trapezoidal (vAx2x8).	47
Figura 3.16 – 4ª Configuração – Excitação tangencial com leitura trapezoidal (vAx4).	47
Figura 3.17 – 4ª Configuração – Excitação tangencial com leitura trapezoidal (vAx16).	48
Figura 3.18 – 6ª Configuração – Leitura e Excitação com espirais.	48
Figura 3.19 – 7ª Configuração – Excitação helicoidal (antes da instalação da bobina sensível)	49
Figura 3.20 – 7ª Configuração – Excitação helicoidal com leitura trapezoidal (vAx2x8)	49
Figura 3.21 – Fixação das sondas à mesa de ensaios.	50
Figura 4.1 – Modelo utilizado para a simulação do conceito 3.	53
Figura 4.2 – Pormenor das bobinas espiral trapezoidais.	53

Figura 4.3 – Posições e orientações de simulação do defeito	54
Figura 4.4 – Representação da densidade de correntes induzidas com defeito tangencial na posição 2.	55
Figura 4.5 – Representação da densidade de correntes induzidas com defeito oblíquo na posição 1.	55
Figura 4.6 – Representação da densidade de correntes induzidas no defeito; a) Vista de perfil do defeito; b) Vista de cima do defeito.	56
Figura 4.7 – Simulação a 500 kHz com defeito tangencial na posição 1.....	56
Figura 4.8 – Simulação a 250 kHz com defeito tangencial na posição 1.....	56
Figura 4.9 – Simulação a 1 MHz com defeito tangencial na posição 1.	57
Figura 4.10 – Simulação a 500 kHz com defeito tangencial na posição 2.....	57
Figura 4.11 – Simulação a 500 kHz com defeito tangencial na posição 3.....	58
Figura 4.12 – Simulação a 500 kHz na posição 1 com diferentes orientações de defeito.	58
Figura 4.13 – Modelo usado.....	59
Figura 4.14 – Vista em corte da malha.....	59
Figura 4.15 – Representação da densidade de correntes induzidas na superfície interior do tubo; a) Em corte; b) No plano das bobinas sensíveis	60
Figura 4.16 – Representação da densidade de correntes induzidas; a) Vista de cima do defeito;	60
Figura 4.17 – Simulação a 250 kHz com defeito tangencial na Posição 1.....	61
Figura 4.18 – Simulação a 500 kHz com defeito tangencial na Posição 1.....	61
Figura 4.19 – Simulação a 1 MHz com defeito tangencial na Posição 1.	61
Figura 4.20 – a) Simulação a 500 kHz com defeito tangencial em b) diferentes posições.	62
Figura 4.21 – a) Simulação a 500 kHz na posição 1 com diferentes orientações de defeito;	62
Figura 4.22 – Modelo usado para o conceito 5.....	63
Figura 4.23 – Representação da densidade de correntes induzidas na superfície interior do tubo.	63
Figura 4.24 – Representação da orientação das CI na superfície interior do tubo; a) Vista de pormenor na zona do defeito; b) Orientação das CI geradas pela bobina.	64
Figura 4.25 – Simulação a 250 kHz com defeito tangencial na posição 1.....	64
Figura 4.26 – Simulação a 1 MHz com defeito tangencial na posição 1.	64
Figura 4.27 – a) Simulação a 500 kHz com defeito tangencial em b) diferentes posições.	65
Figura 4.28 – a) Simulação a 500 kHz na posição 1 com b) diferentes orientações de defeito...	65
Figura 4.29 – Modelo utilizado para a simulação do conceito 7.....	66
Figura 4.30 – Posições e orientações de simulação do defeito	66

Figura 4.31 – Representação da densidade de correntes induzidas na superfície	67
Figura 4.32 – Representação da orientação das correntes induzidas na superfície	67
Figura 4.33 – Simulação a 250 kHz com defeito tangencial na posição 1.....	67
Figura 4.34 – Simulação a 1 MHz com defeito tangencial na posição 1.	68
Figura 4.35 – Simulação a 500 kHz com defeito tangencial na posição 2.....	68
Figura 4.36 – Simulação a 500 kHz com defeito tangencial na posição 3.....	69
Figura 4.37 – Simulação a 500 kHz na posição 1 com diferentes orientações de defeito.	69
Figura 5.1 – Modelação do equipamento em <i>Solidworks</i>	73
Figura 5.2 – Estrutura para o ajustamento da posição da sonda em <i>Solidworks</i>	74
Figura 5.3 – Subestrutura para o ajustamento da posição da sonda modelada em <i>Solidworks</i>	74
Figura 5.4 – Pormenor da prateleira para o computador modelada em <i>Solidworks</i>	75
Figura 5.5 – Interface gráfica do utilizador do <i>software</i> LabVIEW.....	76
Figura 5.6 – a) Resultado final da construção da mesa de ensaios;.....	77
Figura 5.7 – a) Ligação da sonda ao cabo LEMO b) Componentes sem movimento	77
Figura 5.8 – Componentes de controlo e instrumentação.	78
Figura 5.9 – Cotas de atravancamento.	79
Figura 6.1 – Aparato Laboratorial.	84
Figura 6.2 – Tubo em aço ST 52 a) Vista em corte b) Vista isométrica.	84
Figura 6.3 – a) Sonda comercial b) Ilustração esquemática da interface de saída	85
Figura 6.4 – Aplicação da tira ferromagnética às bobinas.	86
Figura 6.5 – Elementos utilizados nos ensaios de varrimento de frequências,	86
Figura 6.6 – Comparação da variação da impedância com o cabo enrolado e desenrolado	87
Figura 6.7 – Comparação da variação da impedância entre as extremidades AC e BD.....	88
Figura 6.8 – Comparação da variação da impedância entre as extremidades AC e AD.	88
Figura 6.9 – Ensaio a 200 kHz com a abordagem 1 no tubo do ITER.	89
Figura 6.10 – Ensaio a 100 kHz com a abordagem 2 no tubo do ITER.	90
Figura 6.11 – Ensaio a 500 MHz com a abordagem 1 no tubo em aço ST 52.	90
Figura 6.12 – Ensaio a 300 kHz com a abordagem 1.....	91
Figura 6.13 – Ensaio a 900 kHz com a abordagem 1.....	92
Figura 6.14 – Ensaio a 3 MHz com a abordagem 1.	92
Figura 6.15 – Ensaio a 900 kHz com a abordagem 2.....	92
Figura 6.16 – Ensaio a 500 kHz com a abordagem 1.....	93
Figura 6.17 – Ensaio a 500 kHz com excitação na bobina central com leitura diferencial nas bobinas esquerda e direita.....	94

Figura 6.18 – Ensaio a 400 kHz com excitação na bobina direita com leitura diferencial nas bobinas central e esquerda.....	94
Figura 6.19 – Ensaio a 500 kHz com excitação na bobina Bc com leitura diferencial nas Be e Bd.	95
Figura 6.20 – Posições utilizadas na configuração 3.	95
Figura 6.21 – Varrimento dos três defeitos a 500 kHz na posição 9.....	96
Figura 6.22 – Ensaio a 250 kHz na posição 5 ao defeito menor.....	97
Figura 6.23 – Ensaio a 5 MHz na posição 5 ao defeito menor.	98
Figura 6.24 – Ensaio a 500 kHz na posição 1 ao defeito menor.....	98
Figura 6.25 – a) Ensaio a 500 kHz ao defeito menor com diferentes posições; b) Posições.	99
Figura 6.26 – Ensaio a 500 kHz na posição 9.....	99
Figura 6.27 – Posições no defeito em relação às bobinas sensíveis.	100
Figura 6.28 – Ensaio a 500 kHz na posição 1.....	101
Figura 6.29 – Ensaio a 500 kHz ao defeito menor na posição 1.....	101
Figura 6.30 – Ensaio a 500 kHz ao defeito menor na posição 1.....	102
Figura 6.31 – a) Ensaio a 500 kHz ao defeito menor com diferentes posições; b) Posições. ...	102
Figura 6.32 – Ensaio a 500 kHz ao defeito menor com diferente número de espiras	103
Figura 6.33 – Ensaio a 500 kHz ao defeito intermédio com defeito a passar pelo centro.....	103
Figura 6.34 – Ensaio a 500 kHz ao defeito menor com diferente número de espiras	104
Figura 6.35 – Ensaio a 500 kHz na posição 1 com tubo em aço ST 52.	104
Figura 6.36 – Posições dos defeitos em relação às bobinas sensíveis.	105
Figura 6.37 – Ensaio a 500 kHz na posição 1.....	105
Figura 6.38 – Ensaio a 500 kHz na posição 1 ao defeito menor.....	106
Figura 6.39 – Ensaio a 500 kHz na posição 2 ao defeito menor.....	107
Figura 6.40 – Ensaio a 500 kHz ao defeito menor na posição 1 bobinas L4 e L5 em diferencial.....	107
Figura 6.41 – Ensaio a 500 kHz na posição 1 ao defeito menor.....	108
Figura 6.42 – Ensaio a 500 kHz na posição 1 com tubo de aço ST 52.	108
Figura 6.43 – Posições dos defeitos em relação às bobinas sensíveis.	109
Figura 6.44 – Ensaio a 500 kHz aos defeitos #2 e #3 na posição 1.....	109
Figura 6.45 – Ensaio a 2 MHz com o defeito menor na posição 1.	110
Figura 6.46 – Ensaio a 1 MHz com o defeito menor na posição 2.	110
Figura 6.47 – Ensaio a 500 kHz ao defeito menor na posição 1 lendo L3 e L5 em diferencial.	110
Figura 6.48 – Ensaio a 500 kHz na posição 1 ao tubo de aço ST 52.	111
Figura 6.49 – Posições dos defeitos em relação às bobinas sensíveis.	111

Figura 6.50 – Ensaio a 500 kHz na posição 1.....	112
Figura 6.51 – Ensaio a 500 kHz ao defeito menor na posição 1.....	112
Figura 6.52 – Ensaio a 750 kHz ao defeito menor na posição 1.....	113
Figura 6.53 – a) Ensaio a 500 kHz ao defeito menor com diferentes posições b) Posições.	114
Figura 6.54 – Ensaio a 500 kHz na posição 1 com o tubo de aço ST 52.	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Especificidades do componente do ITER.	34
Tabela 3.2 – Defeitos padrão presentes no tubo do ITER.....	35
Tabela 3.3 – Propriedades mecânicas do material.	35
Tabela 3.4 – Composição química do material.	36
Tabela 3.5 – Propriedades elétricas do material.....	36
Tabela 3.6 – Requisitos funcionais das sondas.	36
Tabela 3.7 – Modos de funcionamento e orientações de defeitos aplicáveis a cada conceção.	42
Tabela 3.8 – Bobinas fabricadas em substrato flexível.	44
Tabela 4.1 – Estratégia de simulação do conceito 3.	54
Tabela 5.1 – Requisitos funcionais do equipamento para inspeção.....	72
Tabela 5.2 – Estimativa dos custos de produção do equipamento.	80
Tabela 6.1 – Resistências medidas entre os terminais	85
Tabela 6.2 – Abordagens utilizadas na inspeção com a sonda comercial.....	89
Tabela 6.3 – Abordagens utilizadas para os ensaios realizados com a sonda convencional	91
Tabela 6.4 – Comparação das diferentes configurações.	116
Tabela 6.5 – Diferentes configurações com resultados apresentados no plano de impedâncias.	117

NOMENCLATURA

\vec{Z}	Vetor impedância elétrica [Ω]
f	Frequência [Hz]
$Im(\vec{Z})$	Parte imaginária do vetor impedância elétrica [Ω]
$Re(\vec{Z})$	Parte real do vetor impedância elétrica [Ω]
X, x	Comprimento [m]
\varnothing	Diâmetro [m]
δ	Profundidade de penetração das correntes induzidas [m]
σ	Condutividade elétrica [S·m ⁻¹] ou [% IACS]
CI	Correntes Induzidas
CST	<i>Computer Simulation Technology</i>
DAQ	<i>Data acquisition</i>
DEMI	Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
EC	<i>Eddy Currents</i>
END	Ensaio Não Destrutivo
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
FIT	<i>Finite Integration Technique</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
H_p	Campo magnético
H_s	Campo secundário
IACS	<i>International Annealed Copper</i>
ISQ	Instituto de Soldadura e Qualidade
NDT	<i>Non-Destructive Testing</i>
NI	<i>National Instruments</i>
NTI	Núcleo de Tecnologia Industrial
PMMA	Polimetacrilato de Metilo
RFT	<i>Remote Field Testing</i>
UNL	Universidade Nova de Lisboa
US	Ultra-sons

1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Estado da Arte e Motivação

Os Ensaios Não Destrutivos (END) consistem na aplicação de um vasto grupo de metodologias e técnicas de ensaio de modo a inspecionar materiais, componentes, sem que daí resulte alteração nas propriedades do material ou no seu desempenho funcional.

O princípio de funcionamento dos END por correntes induzidas (CI) baseia-se no fenómeno da indução eletromagnética. Os defeitos são detetados com base na variação da impedância elétrica aos terminais de uma bobina (que constitui a sonda). Esta bobina é sujeita a uma corrente elétrica alternada, a qual se desloca ao longo de um material condutor elétrico. No caso de existir um defeito no material a circulação das correntes induzidas é perturbada. Consequentemente, o campo magnético será menos intenso e essa alteração pode ser medida, permitindo assim detetar eventuais defeitos ou outras alterações das propriedades dos materiais.

A motivação para este trabalho deriva da dificuldade encontrada em inspecionar algumas morfologias de defeitos no interior de componentes de geometria tubular. Um exemplo de uma aplicação de END com particular exigência e complexidade tecnológica é a deteção e localização de defeitos num dos componentes que constituem o ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*). O ITER consiste numa central de fusão nuclear, que usa

hidrogénio para produzir 500 MW de energia, através do processo de fusão nuclear. O projeto é uma cooperação internacional que envolve a China, União Europeia, Estados Unidos, Índia, Japão, Coreia do Sul e Rússia. Já está em construção, vai ficar localizado no sul de França e deverá ter a sua primeira operação em 2026 [1]. O componente em questão é um tubo com um perfil particular que pode ser visualizado na Figura 1.1.

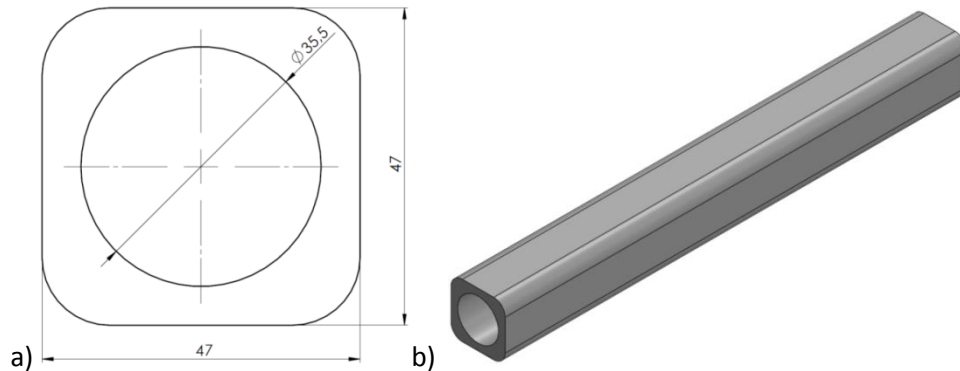


Figura 1.1 – Componente de geometria tubular alvo de estudo.
a) Desenho da secção transversal, b) Modelo tridimensional.

No seu interior serão colocados supercondutores pelo que não deve existir qualquer defeito pois tal pode provocar danos incalculáveis. Na Figura 1.2 é possível identificar a localização do componente a ensaiar (*Poloidal Coil*) no reator. Como ilustrado na Figura 1.2, o tubo será curvado. Os END em causa são realizados numa fase anterior à sua dobragem.

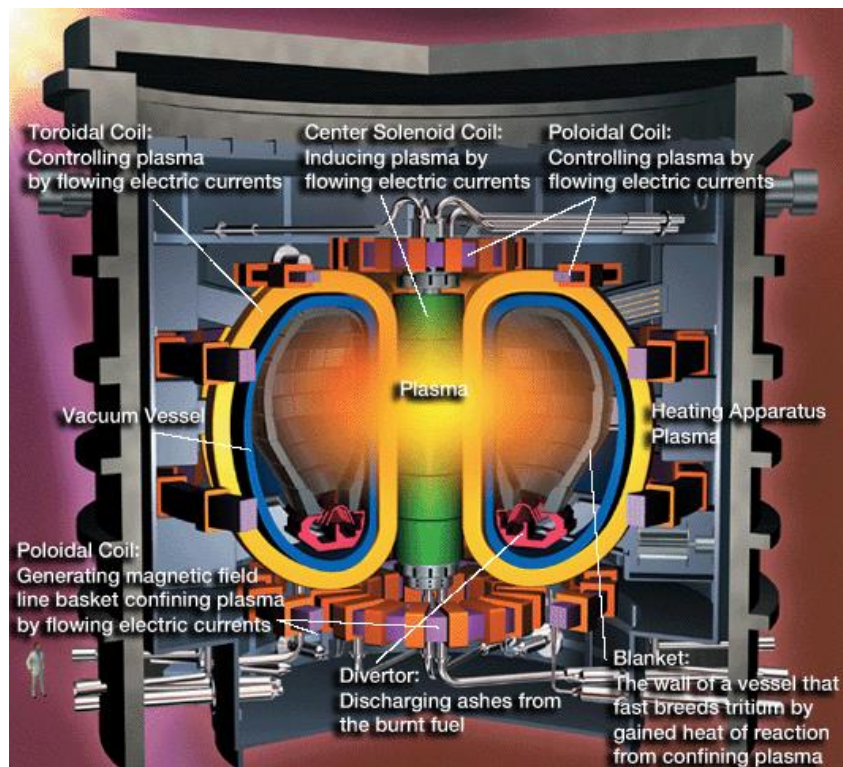


Figura 1.2 – Ilustração com os principais constituintes do ITER [2].

É necessário detetar eventuais defeitos de reduzida dimensão, quer estejam dispostos na direção axial quer na direção tangencial. Atualmente, as sondas convencionais de CI permitem detetar defeitos axiais com alguma facilidade. No entanto, verificou-se que os defeitos transversais de comprimento inferior a 4 mm são de muito difícil deteção. O componente a investigar é composto por aço 316LN (JK2LB). É conhecido como 18/8 inoxidável devido à sua composição química, que inclui cerca de 18% de cromo e 8% de níquel em peso. O aço é de fácil enformação, soldabilidade e é muito resistente à corrosão [3].

1.2 – Objetivo

O objetivo deste trabalho foi desenvolver e validar experimentalmente diferentes tipos de sondas de Correntes Induzidas (CI) para a deteção de micro defeitos no interior de componentes em geometria tubular. Pretende-se com isso reduzir consideravelmente o atual limiar de detetabilidade dos defeitos, nomeadamente com orientação transversal, e assim aumentar a fiabilidade de inspeção.

Para alcançar este objetivo principal foram definidos também mais dois objetivos, um de carácter mais científico e outro de carácter mais tecnológico. O primeiro consiste em descrever e caracterizar os fenómenos eléctricos e magnéticos envolvidos no funcionamento das sondas, através de simulações numéricas com o método dos elementos finitos (MEF). Pretende-se avaliar e prever os efeitos dos diferentes parâmetros de inspeção e tipos de defeitos. Esta informação é relevante, pois permite otimizar a geometria e os modos de funcionamento das sondas, ao mesmo tempo que consiste numa ferramenta muito útil para a interpretação dos sinais obtidos durante os ensaios experimentais de validação.

Quanto ao objetivo secundário de carácter tecnológico, este consistiu na criação de meios laboratoriais adequados para a realização dos END. Pretendeu-se desenvolver, nomeadamente, um dispositivo de posicionamento e movimentação automatizado das sondas, e respetiva eletrónica de controlo e aquisição de sinal.

As principais dificuldades que estão a ser encontradas no ensaio deste componente são:

- Os defeitos que se pretendem detetar são extremamente pequenos. É necessário detetar defeitos a partir dos 2 mm de comprimento, 0,5 mm de profundidade e 0,2 mm de espessura;
- É necessário detetar defeitos transversais;
- O material do componente é mau condutor eléctrico, apenas 2,5% IACS, o que dificulta a sua inspeção.

1.3 – Metodologia

Para a resolução deste problema foram construídas um conjunto de sondas de correntes induzidas com uma geometria cilíndrica para a inspeção interior de tubos.

As configurações das sondas foram definidas e modeladas num *software* de simulação numérica permitindo conhecer o comportamento de cada configuração face aos diferentes defeitos e parâmetros de inspeção.

Todas as sondas foram produzidas e validadas experimentalmente, no laboratório de ensaios não destrutivos do DEMI na FCT, em dois tubos de materiais diferentes.

Para garantir condições de ensaio idênticas foi construído um equipamento onde foram realizados os ensaios, o qual proporciona o movimento linear da sonda no interior dos componentes a inspecionar.

1.4 – Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada em sete capítulos, ao longo dos quais se fazem referência a todas as matérias tratadas.

No Capítulo 1 de carácter introdutório, explicam-se os objetivos da dissertação e faz-se uma breve introdução à motivação subjacente a este trabalho.

No Capítulo 2 apresenta-se o resultado da pesquisa bibliográfica e o estado da arte, identificando os principais autores na área dos END por CI, mais especificamente na inspeção de geometrias tubulares. Esta pesquisa permitiu elaborar um resumo do estado da arte apresentando os END do ponto de vista global, o conceito geral de CI, os principais desenvolvimentos nas sondas de CI relevantes para este estudo em particular e sondas comerciais atualmente disponíveis no mercado.

No Capítulo 3 são apresentados os requisitos funcionais que as sondas a produzir devem respeitar. Foram criados vários conceitos de sondas e explicada a sua aplicação. Está também descrita a sua solução construtiva e forma de produção.

O Capítulo 4 contém a modelação numérica dos diferentes conceitos de sondas, a qual foi efetuada no *software* CST Studio Suite, a modelação abrangeu campos magnéticos e correntes induzidas para diversas configurações de sonda. Neste sentido, apresentam-se os modelos de

simulação utilizados, a estratégia empregue para cada conceito e são apresentados os resultados das simulações.

No Capítulo 5 descreve-se a conceção, projeto e construção do sistema automatizado de inspeção, nomeadamente os seus requisitos funcionais, como a mecânica envolvida e respetivo controlo e instrumentação.

No Capítulo 6 apresentam-se os resultados obtidos experimentalmente para as diferentes configurações das sondas. Apresentam-se também a caracterização e os ensaios realizados com a sonda comercial nas mesmas condições para possível comparação.

No Capítulo 7 apresentam-se as conclusões e as sugestões para desenvolvimentos futuros.

No final da dissertação apresenta-se um conjunto alargado de anexos relativos à caracterização das sondas e os resultados obtidos experimentalmente.

2 – REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

2.1 – Introdução

Neste capítulo apresenta-se a pesquisa bibliográfica realizada com o objetivo de caracterizar o estado da arte no domínio dos Ensaios Não Destrutivos (END) por Correntes Induzidas (CI), nomeadamente, no que diz respeito aos tipos de sondas de CI existentes e às diferentes técnicas de inspeção de geometrias tubulares, expondo as suas vantagens e inconvenientes. São ainda expostas sondas de correntes induzidas para geometrias tubulares existentes atualmente no mercado.

2.2 – Ensaios Não Destrutivos

Os Ensaios Não Destrutivos (END) consistem na aplicação de um vasto grupo de metodologias e técnicas de ensaio de modo a analisar materiais, componentes ou equipamentos, sem que daí resulte alguma alteração nas propriedades do material ou no seu desempenho funcional [4, 5].

Os END são atualmente técnicas industrialmente relevantes, uma vez que permitem controlar o estado dos materiais e equipamentos, sendo passíveis de realizar em componentes acabados ou semiacabados. O tipo de ensaio correto permite obter informações sobre o

estado de degradação de um determinado componente, indicando os tipos de defeitos que possui, bem como a sua localização e dimensão [4, 6, 7].

São muito utilizados na indústria por serem económicos em termos de consumo de tempo e por não comprometerem o uso futuro das peças inspecionadas. Têm como principais aplicações [8]:

- Inspeção de material base (matéria prima) antes de ser processado – deteção de defeitos inerentes ao material;
- Inspeção de produtos durante o seu fabrico – controlo de qualidade do processo;
- Inspeção de produtos depois d terminado o seu fabrico – controlo de qualidade do produto final – deteção de defeitos com origem no fabrico;
- Inspeção de componentes em serviço – manutenção de equipamentos – deteção de defeitos como origem no serviço;
- Caracterização de propriedades dos materiais e metrologia – medição de condutividade eléctrica, velocidade do som, espessuras de revestimentos e tintas, variações estruturais e caracterização de microestruturas.

As principais técnicas de Ensaio Não Destrutivos

Devido às inúmeras tecnologias de END, estas podem ser classificadas em função dos princípios físicos associados, entre os quais se destacam: as ondas eletromagnéticas e as ondas acústicas.

As técnicas de END mais relevantes do ponto de vista da sua aplicação industrial são: inspeção visual (IV), líquidos penetrantes (LP), partículas magnéticas (PM), correntes induzidas (CI), ultra-sons (US) e Raios X (RX).

2.3 – Correntes Induzidas (CI)

Michael Faraday descobriu que quando um campo magnético variável atravessa um material condutor, ou quando um condutor se move por um campo magnético não uniforme, uma corrente eléctrica flui através desse condutor se houver um caminho fechado por onde esta possa circular. Este fenómeno é conhecido pela Lei da Indução de Faraday [9, 10].

Em 1879 David Edward Hughes deu uma enorme contribuição ao demonstrar que uma bobina, percorrida por uma corrente eléctrica alternada, quando em contacto com um material

de diferente condutividade e permeabilidade magnética, produz uma alteração da sua impedância elétrica (\vec{Z}). Este ponto marcou o início da aplicação das CI nos END. [11, 12]

A Lei de Indução de Faraday e a variação da impedância elétrica da bobina constituem os fundamentos do método END por CI. A geração de correntes induzidas é obtida quando a uma bobina, por exemplo espiral helicoidal, se impõe uma corrente elétrica alternada criando-se assim um campo magnético (H_p) como esquematizado na Figura 2.1 caso (a). Quando a bobina é colocada sobre a peça condutora a ensaiar, são criadas correntes elétricas na peça, conhecidas como correntes induzidas, *eddy currents* ou correntes de Foucault, como está representado na Figura 2.1 caso (b).

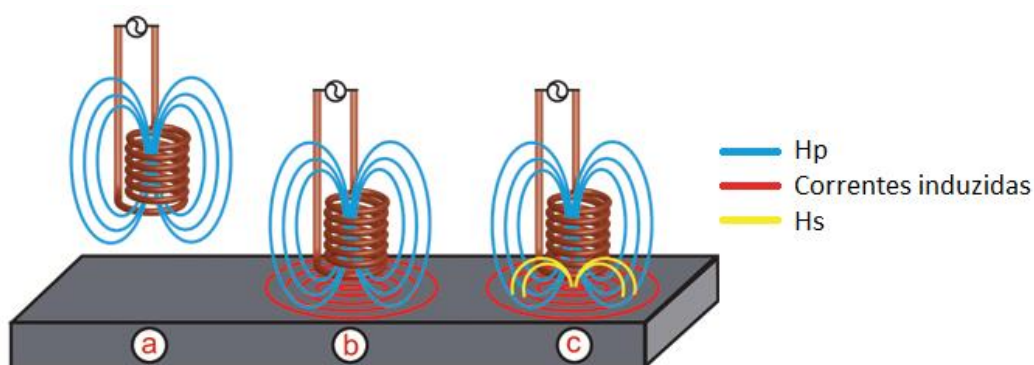


Figura 2.1 - Campos magnéticos e correntes geradas pela sonda de CI [13].

A corrente induzida na peça cria um campo magnético secundário H_s que contraria o campo primário H_p e induz uma corrente na bobina que constitui a sonda. A redução do campo primário H_p provoca um aumento da resistência e a alteração do valor da indutância, de acordo com uma trajetória como representada na Figura 2.2.



Figura 2.2 – Plano resposta de impedâncias das CI [12].

Existindo defeitos na peça, a trajetória das correntes induzidas vai ser perturbada (podendo ser desviada ou limitada). O efeito da oposição destas correntes ao campo H_p (ver Figura 2.1c) será menor, manifestando-se esta alteração em termos de uma variação da impedância elétrica da bobina. Este método é apenas aplicável a materiais condutores de eletricidade, sejam eles ferromagnéticos ou não. As correntes induzidas concentram-se à superfície do material (efeito de pele), reduzindo-se exponencialmente a sua densidade com o aumento da profundidade de acordo com a Eq. 1. Em que $I_x [A \cdot m^{-2}]$ é a densidade de corrente à profundidade $x[m]$, $I_0 [A \cdot m^{-2}]$ é a densidade de corrente à superfície, $f[s^{-1}]$ é a frequência de excitação, $\mu [H \cdot m^{-1}]$ é a permeabilidade magnética ($\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$) e $\sigma [S/m]$ a condutividade elétrica.

$$I_x = I_0 \cdot e^{-x\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}} \quad (1)$$

Devido a este fenómeno, é possível detetar apenas defeitos à superfície ou sub-superficiais. Os defeitos que estão perpendiculares à superfície serão mais fáceis de detetar, do que os paralelos como se representa na Figura 2.3.

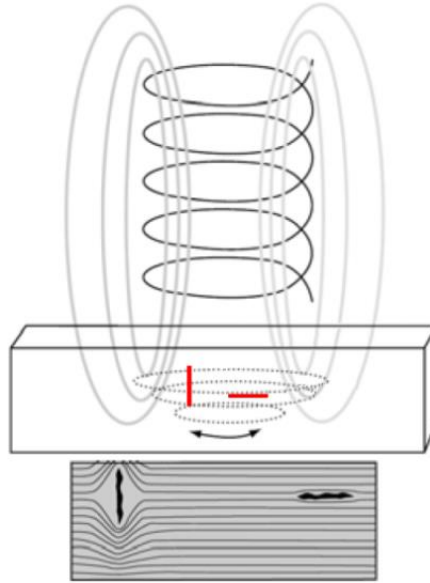


Figura 2.3 – Desvios causados pelos defeitos nas correntes induzidas [8].

A profundidade máxima de penetração das CI, $\delta [m]$, foi convencionada como sendo a profundidade para o qual o valor da densidade de corrente (I_x) é e^{-1} ($\approx 37\%$) da densidade de corrente à superfície do material (I_0). Substituindo estes valores na Eq. 1, resulta o valor da profundidade de penetração de acordo com a Eq. 2.

$$\delta_{(f,\mu,\sigma)} = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}} \quad (2)$$

Este método apresenta algumas limitações e especificidades, nomeadamente:

- Efeito *Lift-off*: define-se pelas alterações de posição da sonda em relação à peça a ensaiar (Figura 2.4). Estas alterações de posição produzem variações na impedância elétrica. A variação da impedância elétrica devido a este efeito pode ser superior à variação provocada pela existência de defeitos. Quando isto acontece, a deteção torna-se muito difícil uma vez que as alterações provocadas pelo defeito são absorvidas pelo ruído do *Lift-off* [6];



Figura 2.4 - Representação qualitativa da intensidade e localização das CI produzidas por uma bobina (vista de corte) [8].

- Efeito pele: Conforme é possível visualizar na Figura 2.4 as correntes induzidas possuem uma penetração no material limitada o que resulta apenas na capacidade de deteção de defeitos superficiais e sub-superficiais. No entanto, para este tipo de defeitos, este efeito é uma vantagem porque possibilita a sua deteção com maior sensibilidade. A profundidade da penetração pode ser aumentada usando frequências mais baixas [14];
- Condutividade Elétrica: o material deve ser obrigatoriamente ser condutor para a geração das correntes induzidas;
- Permeabilidade Magnética: consiste na capacidade de se originar um campo magnético num material: quanto maior for a permeabilidade magnética, maior é a facilidade de induzir um campo magnético. Nos materiais ferrosos a permeabilidade magnética relativa é superior a um ($\mu_r > 1$) e nos não ferrosos é aproximadamente igual a este valor ($\mu_r \approx 1$), o que leva a que a curva de variação de impedância com os defeitos assumam trajetórias diferentes como se observa na Figura 2.2 [15];
- Efeito de bordo: quando a sonda se aproxima das extremidades da peça a ensaiar ocorre uma distorção das correntes induzidas, semelhante à observada quando existe um defeito. Este fenómeno pode dissimular defeitos existentes nas extremidades ou perto destas, uma vez que estas distorções produzem sinais de grande amplitude [6];

Correntes induzidas pulsadas

As correntes induzidas pulsadas ou *pulsed eddy currents* (PEC), conduziram ao desenvolvimento de uma técnica que tem sido utilizada para a deteção e quantificação de corrosão e fissuras em estruturas de aeronaves e na indústria da energia nuclear. Tem como vantagens a maior profundidade de penetração, maior informação acerca dos defeitos, menor sensibilidade a interferências e menores consumos energéticos. As correntes pulsadas consistem numa excitação de sonda com um onda quadrada, que permite, com um único passo, a obtenção de mais informação; a utilização de uma excitação com multifrequências, permite chegar a uma penetração cerca de 10% superior aquela que é conseguida através dos métodos convencionais [16, 17].

Uma das limitações deste método deve-se à direção dos defeitos encontrados nas peças. Apesar dos defeitos encontrados perpendicularmente à corrente induzida serem facilmente detetáveis, os paralelos e os de grande comprimento são de difícil deteção [11, 18].

2.4 – Tipos de Sonda

2.4.1 – Sondas absolutas (apenas uma bobina)

As sondas absolutas de correntes induzidas funcionam com uma única bobina em contacto com o material. Estas sondas também necessitam de uma bobina de referência que pode estar na caixa da sonda, no conector do cabo ou num adaptador à parte. (ver Figura 2.5).

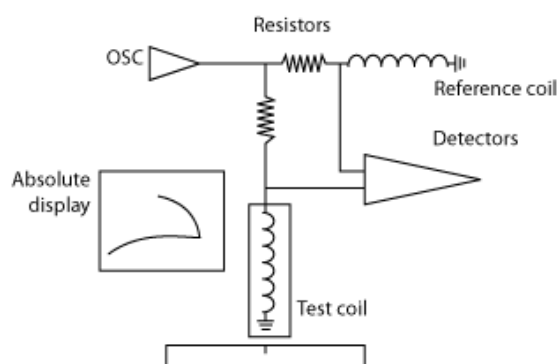


Figura 2.5 – Representação esquemática do modo de operação de uma sonda absoluta [19].

No entanto, podem surgir problemas quando o valor da indutância da sonda não é suficientemente próximo do valor da bobina de referência não permitindo uma correta calibração do instrumento. O resultado é um mau desempenho (ruído ou fraca sensibilidade) ou a não obtenção de qualquer resposta (saturação do sinal).

2.4.2 – Sondas do tipo *bridge*

Nesta configuração, as bobinas estão localizadas numa "ponte" elétrica (Figura 2.6). O instrumento equilibra a ponte e qualquer mudança no equilíbrio é apresentada com uma variação do sinal. Nesta disposição, a mesma bobina produz as correntes induzidas e detecta as alterações de impedância causadas pelos defeitos ou qualquer outra variável. Quase todos os instrumentos são capazes de operar com este tipo de configuração.

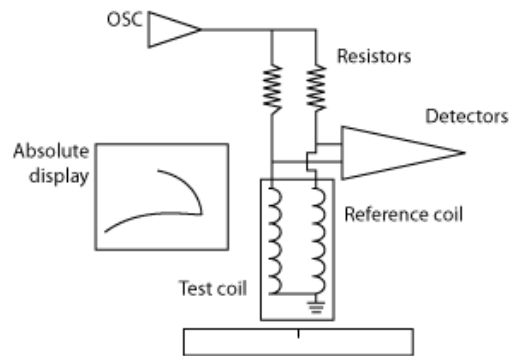


Figura 2.6 – Representação esquemática do modo de operação de uma sonda do tipo bridge [19].

2.4.3 – Sonda do tipo reflexão

Nesta configuração, as correntes induzidas são produzidas por uma bobina de excitação. Os sinais recebidos na sonda são detetados por outra bobina chamada bobina de recepção (Figura 2.7).

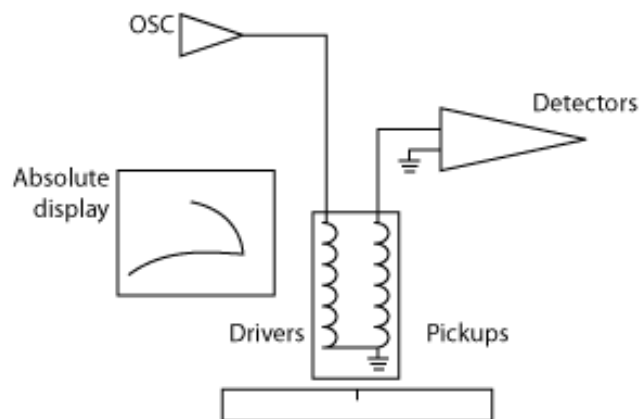


Figura 2.7 – Representação esquemática do modo de operação de uma sonda do tipo reflexão [19].

2.4.4 – Comparação entre sondas tipo Bridge e sondas tipo Reflexão

A comparação entre os dois tipos de sondas permite as seguintes constatações:

- **Ganho:** As sondas de reflexão permite um ganho superior, particularmente se estiverem "sintonizadas" para uma frequência específica, mas normalmente a diferença é, em média, cerca de 6 dB. Estas sondas duplicam o sinal o que, em aplicações críticas, é favorável.
- **Gama de frequências:** As sondas de reflexão não precisam de equilibrar ambas as bobinas (de excitação e receção), o que permite uma gama de frequências mais ampla. Desde que a bobina de excitação produza as correntes induzidas, a bobina de receção detetá-las-á e exibirá algum sinal. Pode não fornecer informações significativas em determinadas frequências, mas a sonda continuará a funcionar.
- **Intervalo de frequências:** As sondas do tipo *bridge* permitem um intervalo de frequências limitado nos instrumentos mais antigos, uma vez que estes tinham de equilibrar uma ponte elétrica usando outros braços (controlos X e R). Nos instrumentos mais modernos, a ponte é normalmente formada com resistências de precisão fixas, ou um transformador fixo no seu interior. Os sinais detetados desta maneira são processados eletronicamente sem quaisquer ajustes "mecânicos", o que significa uma maior capacidade de equilíbrio sobre uma gama de frequências mais ampla.
- **Drift:** Causado principalmente pela mudança de temperatura nas bobinas. Pode ser causado pela variação da temperatura ambiente, pelo calor produzido pela corrente ou ambos. Existem parâmetros de projeto que podem ser otimizados para reduzir o *drift*, como diâmetro do fio e a seleção da ferrite, mas as sondas de reflexão são consideradas, uma opção adequada para evitar este problema.

Nas sondas de reflexão, a corrente da bobina de excitação não flui através das bobinas de receção; de facto, o campo magnético recebido é normalmente muito menor e, consequentemente, a corrente que flui na receção é também reduzida. Uma sonda de reflexão é quase sempre mais difícil de fabricar e, portanto, mais cara.

2.4.5 – Sondas em Absoluto, *Bridge* e Diferencial

A designação de sonda "diferencial" surge quando o sinal exibido corresponde a uma variação da impedância de acordo com uma trajetória do tipo '∞'. Isto acontece quando as duas bobinas detetam o defeito em sequência. Quando ambas as bobinas estão à superfície da sonda, compensam o *lift-off* e, como resultado, nenhuma linha é visível (Figura 2.8).

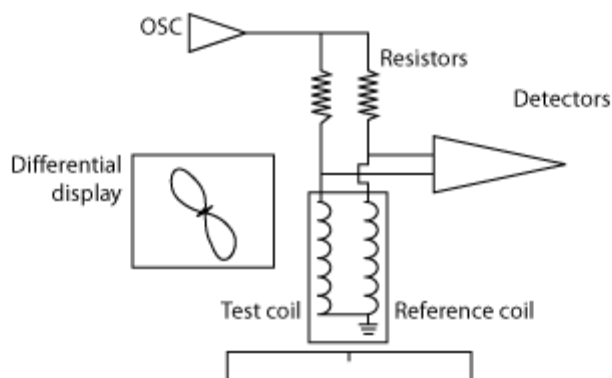


Figura 2.8 – Representação esquemática do modo de operação de uma sonda *bridge* diferencial [19].

Em contraste, nas sondas do tipo absoluto ou *bridge* o sinal é produzido por uma única bobina, apresentando uma única trajetória curva, com uma linha quase horizontal de *lift-off*. Existe quem chame sonda "diferencial" simplesmente quando as bobinas são ligadas diferencialmente, tais como num circuito *bridge*. O problema com esta definição é que as sondas também podem ser conectadas diferencialmente com um sistema de reflexão, usando duas bobinas de recepção. Neste caso, as duas bobinas de recepção estão posicionadas perto uma da outra (ver Figura 2.9).

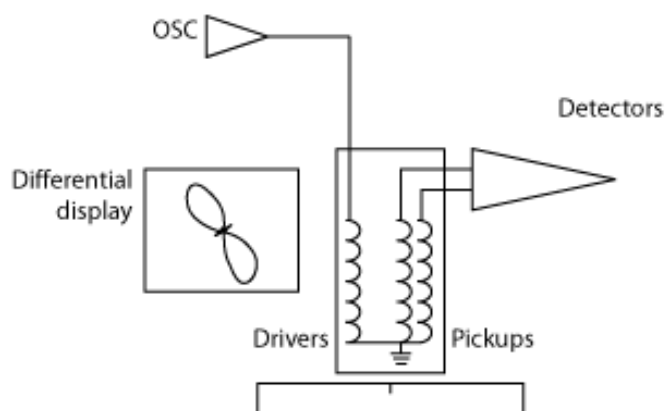


Figura 2.9 – Representação esquemática do modo de operação de uma sonda reflexão diferencial [19].

A melhor maneira evitar esta confusão é muitas vezes especificar a sonda como absoluta, *bridge*, reflexão, *bridge* diferencial ou reflexão diferencial, conforme necessário, qualificando a descrição de acordo com o sinal apresentado.

2.5 – Inspeção de Tubos por Correntes Induzidas

A inspeção de tubos por correntes induzidas é usada para detetar corrosão, desgaste, fissuras e outras alterações nas tubagens. Os permutadores de calor e os geradores de vapor,

que são utilizados nas centrais de energia, têm milhares de tubos cuja existência de fugas, é inadmissível. Isto é especialmente importante em centrais nucleares onde a água contaminada deve ser impedida de se misturar com a água que será devolvida ao meio ambiente [20].

A técnica de inspeção por correntes induzidas é amplamente aplicada devido à sua facilidade de execução. É principalmente aplicada com sondas compostas por bobinas coaxiais com os tubos a inspecionar o que permite um aumento da velocidade de inspeção [21].

Estas sondas podem ser usadas em modo absoluto ou diferencial. No modo absoluto a medição é feita com recurso a apenas uma bobina de receção e é usada para detetar defeitos que variam gradualmente, como a redução de espessura do tubo devido à corrosão [22]. No modo de funcionamento diferencial é comparada a diferença da impedância de duas bobinas de receção com enrolamentos em sentidos opostos. Reciprocamente, o modo diferencial é sensível a defeitos mais pontuais, como fendas ou corrosão localizada e é ainda sensível aos efeitos anómalos, como a oscilação da sonda ou variações graduais da parede do tubo [23]. É possível visualizar na Figura 2.10 a resposta obtida em cada um dos modos.

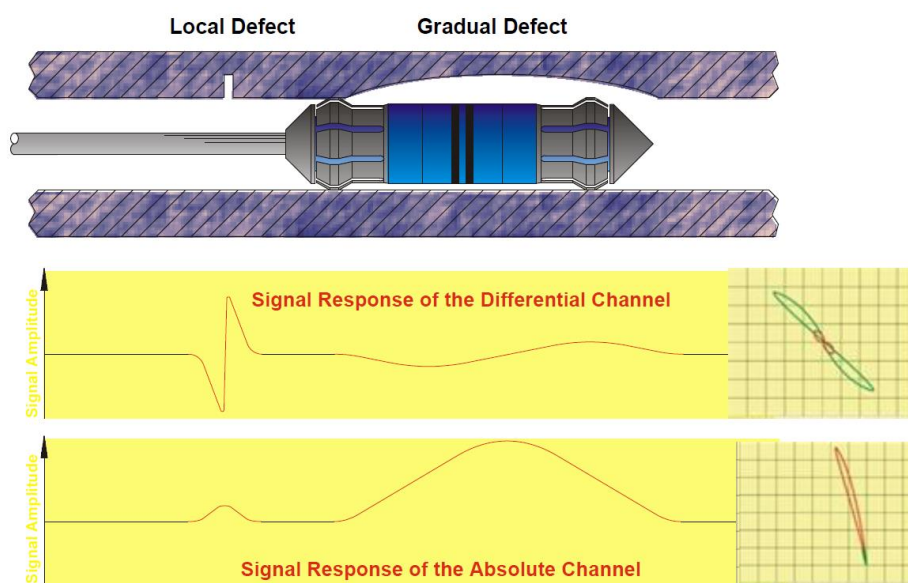


Figura 2.10 – Comparação do sinal gerado por uma sonda absoluta e uma sonda diferencial [24].

As correntes induzidas pelas sondas convencionais são orientadas tangencialmente como se representa na Figura 2.11. Um sinal é gerado quando um defeito perturba o fluxo da corrente induzida, assim, defeitos transversais à direção da corrente induzida produzem sinais significativos, enquanto defeitos paralelos às correntes induzidas produzem sinais muito limitados ou não produzem sinal algum. Assim, as sondas convencionais são ideais na deteção de defeitos axiais mas bastante limitada no que respeita a defeitos tangenciais.

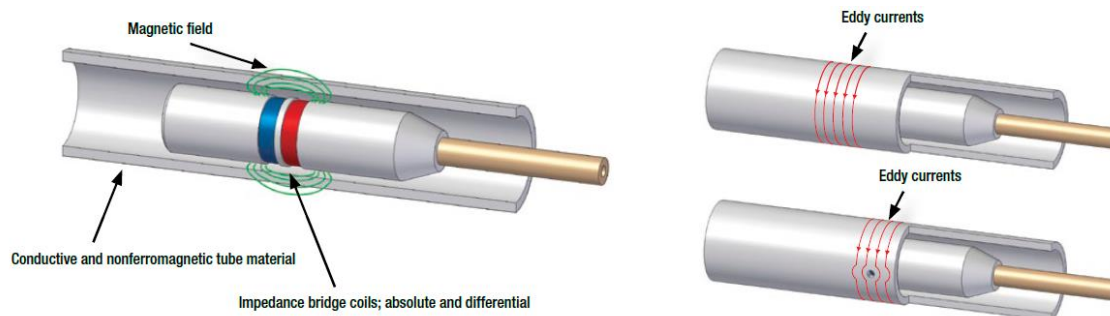


Figura 2.11 – Exemplo de uma sonda convencional para inspeção de interior de tubos [19].

2.5.1 – Sondas com Bobinas Inclinadas

Na detecção de defeitos tangenciais, é mais eficaz a corrente ser gerada na direção axial [25]. Para o conseguir, o campo magnético deve ser orientado tangencialmente, o que significa que a corrente de excitação do fio da bobina fluirá na direção axial. Assim, Young Joo-Kim et. All. [26] testou uma sonda composta por bobinas inclinadas as quais produzem correntes induzidas numa direção intermédia entre a axial e a tangencial de acordo com o ângulo usado.

A Figura 2.12 mostra a disposição da bobina que permite o fluxo de corrente induzida na direção inclinada. As sondas de enrolamento inclinado são constituídas por duas bobinas. A inclinação da bobina pode ser 45°, 30° ou qualquer ângulo considerando a sensibilidade e comprimento de sonda.

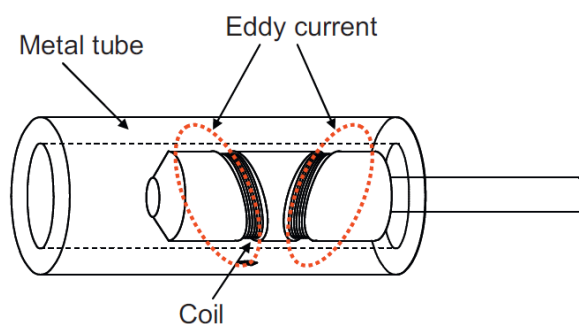


Figura 2.12 - Sonda com as bobinas inclinadas [26].

Em geral, como a direção do campo magnético é transversal ao fio de enrolamento da bobina, as correntes por ele induzidas são na direção do fio. Estando a bobina inclinada, a corrente induzida tem uma componente axial, bem como uma componente tangencial e é perturbada quando encontra defeitos na direção tangencial. No entanto, os defeitos que são paralelos ao enrolamento não interagem significativamente com as correntes, portanto, para uma inspeção completa em todas as direções, vários enrolamentos com diferentes ângulos de inclinação devem ser utilizados em conjunto. É aconselhável que seja do tipo diferencial e composta por dois enrolamentos. O ângulo de inclinação entre os dois enrolamentos pode ser

paralelo, simétrico ou torcido um com o outro. Os três tipos de sondas estão apresentados na Figura 2.13 e ambos têm méritos e deméritos.

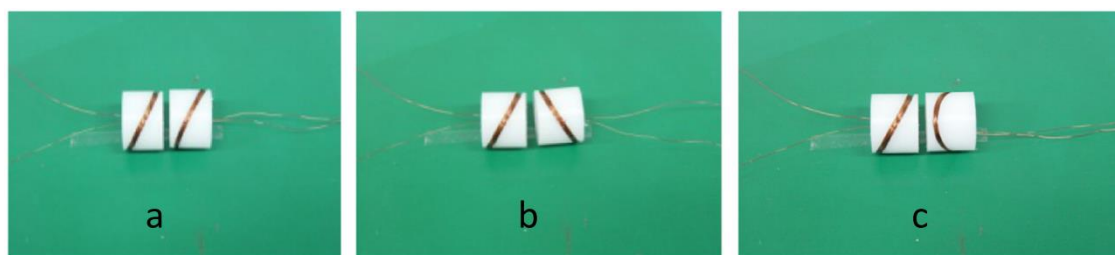


Figura 2.13 – Sondas de bobina inclinada, a) Paralela, b) Simétrica, c) Torcida [26].

Como foi mencionado, semelhante à sonda convencional, a amplitude do sinal da sonda de bobina inclinada é afetada pela direção do defeito no tubo. Na Figura 2.14(a), a falha 'A', que é transversal para os enrolamentos da bobina, provoca um sinal com uma grande amplitude, enquanto a falha 'B' na Figura 2.14(a), que é paralela aos enrolamentos da bobina, pode não ser detetada. Por esta razão, a disposição em paralelo, na Figura 2.14(b), pode falhar na detecção de defeitos que são no mesmo sentido que os enrolamentos das bobinas. A sonda simétrica, conforme mostrado na Figura 2.14(c) foi concebida para melhorar a sonda paralela. Pois, mesmo que uma bobina deixe de detetar uma falha com o mesmo ângulo, a outra bobina, que usa um ângulo diferente pode fazê-lo.

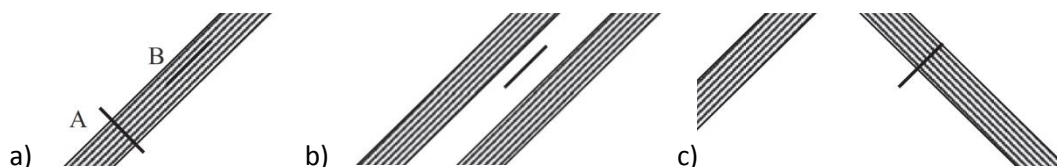


Figura 2.14 – Relação entre bobinas e defeitos.

- a) Defeitos transversos geram sinais com amplitudes superiores que defeitos paralelos com a bobina, b) bobinas paralelas podem não detetar os defeitos e c) Bobinas simétricas podem detetar defeitos em qualquer direção [26].

Contudo, a sonda simétrica tem também um contra irrevogável: como se ilustra na Figura 2.15 as correntes induzidas nas posições b) e c) serão ambas orientadas no sentido tangencial o que pode inviabilizar a detecção de defeitos tangenciais.

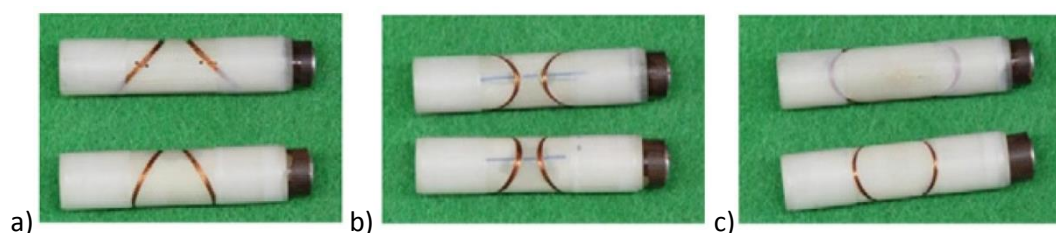


Figura 2.15 – Duas sondas de bobinas inclinadas com diferentes ângulos de inclinação. a) Referencia, (b) roladas 90° e (c) roladas 270°.

A inclinação das bobinas afeta os sinais. Foram testadas sondas com inclinação de 45° e 30° num tubo de inonel 690 com diâmetro interior de 17 mm. As sondas com uma inclinação de 45° são mais sensíveis aos defeitos tangenciais (até 4 mm de comprimento, 0,15 de espessura e passante) mas, as de 30° são também sensíveis. O aumento da inclinação implica um aumento do comprimento total da sonda, o que pode ser uma barreira para ensaios em tubos dobrados em U [26].

A sonda com dois enrolamentos com a mesma inclinação, mas com um ângulo de rotação de 90° (ver Figura 2.13c) consegue ter ambas as bobinas com diferentes orientações face aos defeitos. Ou seja, todas as falhas são detetadas. No entanto, pequenas falhas nem sempre geram sinais óbvios. Estas sondas mostram uma superioridade face às sondas convencionais em termos de deteção de defeitos tangenciais e também detetam defeitos axiais [26].

2.5.2 – Sondas IOnic

Como referido no Capítulo 1, o objetivo central deste trabalho é o desenvolvimento de sondas de CI dedicadas para a inspeção de geometrias tubulares, conforme se descreve no Capítulo 3. Dado que algumas dessas conceções de sondas apresentam finidade com o modelo de funcionamento da sonda IOnic descreve-se com algum detalhe neste ponto o princípio de funcionamento desta sonda.

A Sonda *IOnic* é um conceito de sondas por correntes induzidas para aplicação em ensaios não destrutivos, patenteada em 2007, por Telmo Santos e Pedro Vilaça [27].

A criação desta sonda teve como principal objetivo colmatar algumas limitações dos métodos anteriores, aumentando a capacidade de deteção dos defeitos com dimensão ou morfologia de difícil deteção, por via da eliminação do efeito de *lift-off* e da proximidade da sonda com a superfície do material a inspecionar. A sonda caracteriza-se por uma conceção inovadora, com uma bobina de excitação toroidal e uma bobina sensível espiral plana perpendicular à primeira e paralela à superfície de inspeção, o que elimina o ruído do sinal causado pela variação da sua posição relativamente ao material a ensaiar, e permite detetar defeitos que seriam dissimulados pelo ruído do *lift-off*. Outra vantagem da sonda é a possibilidade de inspecionar os bordos do material e, também, operar segundo um método de inspeção baseado na análise do sinal durante um movimento de rotação de 360° da sonda sobre si própria como se representa na Figura 2.20 [18].

Esta sonda tem como principais componentes um filamento de excitação e duas bobinas sensíveis, sendo constituída por 5 elementos com a seguinte nomenclatura (Figura 2.16a):

- Bobina de excitação toroidal (1);
- Bobina sensível espiral plana (2);
- Suporte das bobinas (3);
- Suporte da bobina de excitação (4);
- Terminais das bobinas sensíveis (5). [11]

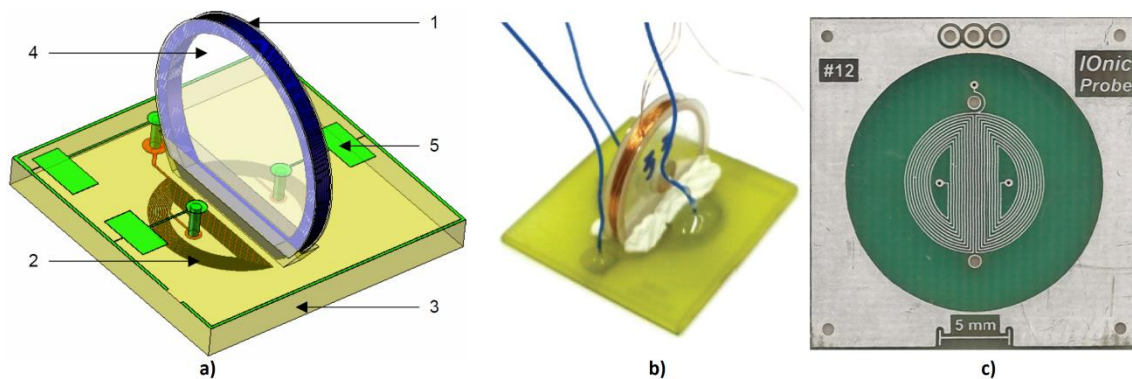


Figura 2.16 – Alguns dos estádios da sonda IOmic [27].

O objetivo principal desta conceção consiste em criar uma independência entre o sinal da sonda e o campo das correntes induzidas num material perfeitamente homogéneo, ou seja, sem qualquer defeito. Isto significa obter um sinal constante aos terminais da sonda, independentemente da condutividade global do material homogéneo e da posição da sonda relativamente ao mesmo material (*lift-off*), quer esta se encontre no ar ou sobre o material.

Ao nível elétrico isto corresponde a eliminar o efeito de indução da bobina sensível, pois o efeito de autoindução depende do campo das correntes induzidas, que depende por sua vez da condutividade elétrica e da permeabilidade magnética dos materiais, bem como da frequência do fluxo de campo magnético que atravessa as suas espiras [18].

Para melhor perceção do funcionamento desta sonda do ponto de vista dos campos magnéticos e das correntes elétricas apresentam-se na Figura 2.17 três casos distintos.

A primeira situação de funcionamento da Figura 2.17 corresponde a quando a sonda está no ar ou com *lift-off* infinito. A bobina de excitação toroidal, (1) da Figura 2.16a, ao ser percorrida por uma corrente elétrica sinusoidal a) induz um campo magnético b), de acordo com a lei de Biot-Savart, que por sua vez induz uma corrente c) na bobina sensível espiral plana, (2) da Figura 2.16a, de acordo com a lei geral da indução. O traçado especial da bobina

sensível espiral plana, com duas semicircunferências espirais de sentidos opostos, faz com que o fluxo do campo magnético b) tenha duas contribuições opostas para a corrente global induzida nesta espiral [11]. Assim, a corrente induzida na metade esquerda é anulada pela corrente induzida na metade direita, o que resulta numa corrente global nula e consequentemente um U_{out} também nulo aos terminais T1 e T2 da bobina sensível espiral plana. Estas três grandezas elétricas, corrente da bobina de excitação, campo magnético e corrente induzida nas bobinas sensíveis, vão manter-se presentes e inalteradas nas duas seguintes situações de funcionamento [27].

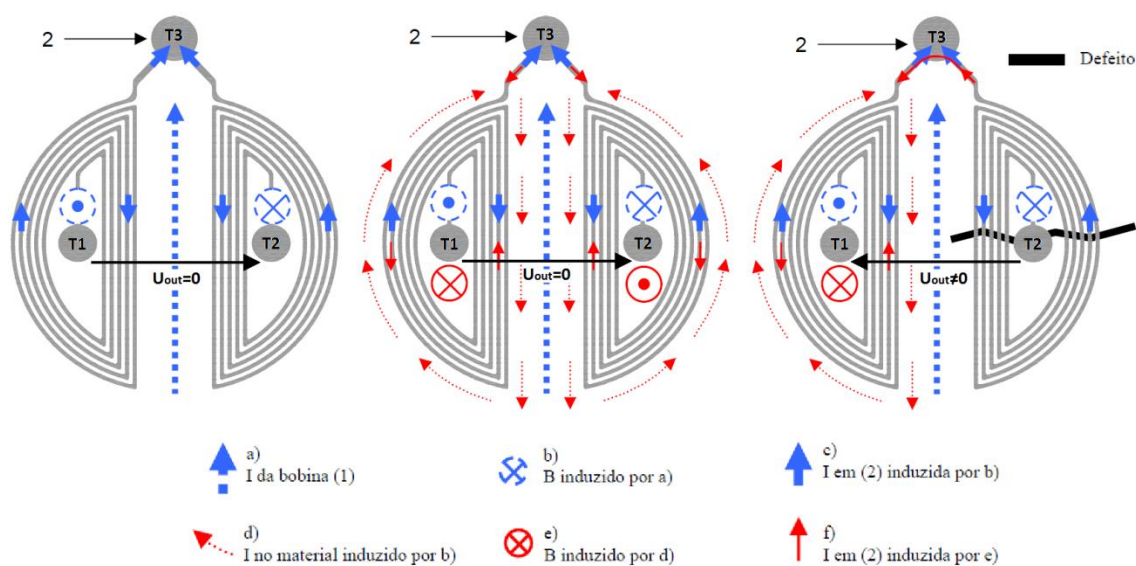


Figura 2.17 - Representação esquemática das correntes (I) e dos campos magnéticos (B) envolvidos no funcionamento da sonda em vazio, sobre material homogêneo e sobre material com defeito [28].

A segunda situação de funcionamento da Figura 2.17 corresponde a quando a sonda está em contacto com um material homogêneo. Quando a sonda se aproxima de um material livre de defeitos, para além das três grandezas elétricas da primeira situação aparece também no material homogêneo um campo de corrente elétrica d), com a forma aproximada de duas semicircunferências, que é induzida pelo campo magnético b) de acordo com a lei geral da indução. Esta corrente elétrica d) induz um campo magnético e), que por sua vez induz uma corrente f) na bobina sensível espiral plana (2) [11]. Sendo o material homogêneo, com condutividade constante, todas as correntes presentes na sonda e todos os campos magnéticos ir-se-ão manter simétricos relativamente ao plano de simetria da bobina sensível espiral plana. Nestas condições, a corrente global induzida na bobina sensível espiral plana será nula, assim como a diferença de potencial aos seus terminais.

A terceira situação de funcionamento da Figura 2.17 corresponde a quando a sonda está em contacto com um material com defeito. A existência de um defeito sob uma das semicircunferências cria uma perturbação à circulação da corrente induzida d) e consequentemente uma diminuição do campo magnético e), que por sua vez provoca uma diminuição da corrente induzida f) na bobina sensível espiral plana. Esta situação introduz um desequilíbrio da corrente induzida f), que se traduz pelo aparecimento de uma diferença de potencial aos terminais da bobina sensível espiral plana sendo assim detetada a existência de defeitos [11, 27].

Em seguida, apresentam-se outros aspetos relevantes de funcionamento que transcorrem da conceção da sonda IOnic como:

1. O carácter tridimensional de circulação das CI (Figura 2.18) no material a inspecionar uma vez que as correntes induzidas circulam em todos os planos com rotação segundo o eixo definido pelo filamento de excitação, permitindo assim uma melhor deteção de defeitos comparativamente às sondas convencionais, independentemente da sua morfologia, como se pode observar na Figura 2.19 [18].
2. O paralelismo da bobina sensível espiral plana e a sua proximidade ao material a inspecionar contribuem para aumentar a sensibilidade da sonda aos defeitos de reduzida dimensão ou de morfologia de difícil deteção.
3. A direção retilínea das correntes induzidas pelo filamento de excitação no material, pode ser usado como vantagem nas inspeções em que existe um conhecimento *a priori* das orientações preferenciais dos defeitos.

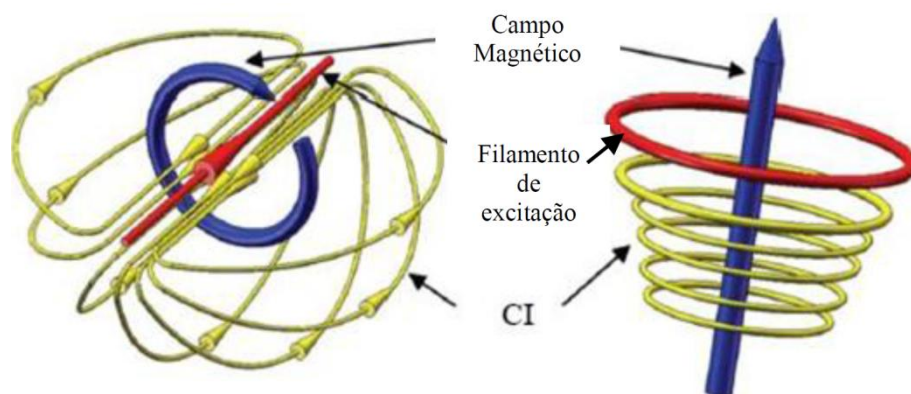


Figura 2.18 – Representação dos campos magnéticos e respetivas correntes induzidas nas sondas IOnic e convencionais [28].

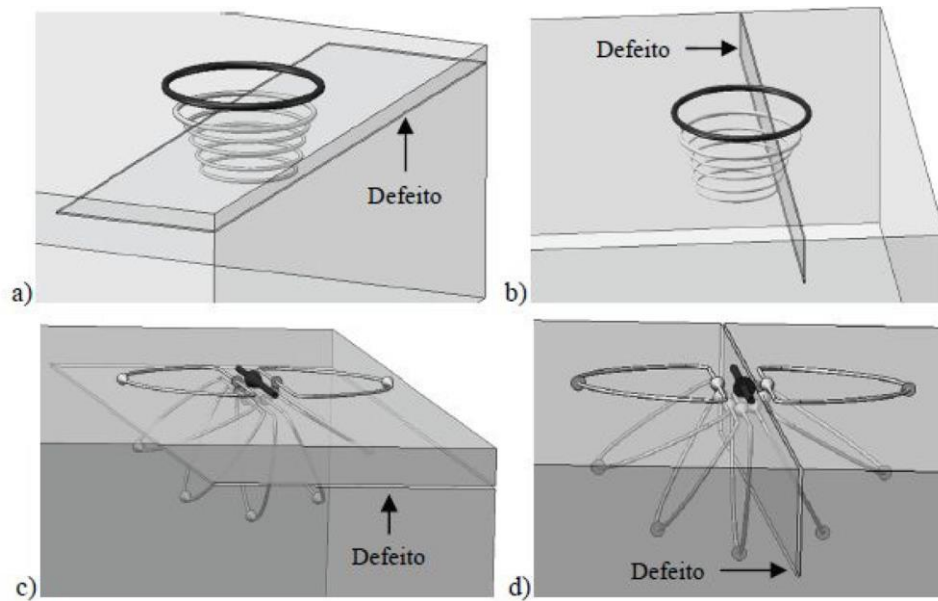


Figura 2.19 – Circulação das CI em defeitos superficiais:

a) Sonda convencional difícilmente detectará o defeito paralelo à superfície ao contrário de um defeito perpendicular como em b). c) e d) Sonda IONIC detectará o defeito em qualquer disposição [28].

4. A redução do efeito de bordo, desde que o filamento de excitação se encontre perpendicular ao bordo do material, a tensão elétrica U_{out} medida nas bobinas sensíveis não é alterada pela ausência parcial de material.
5. A possibilidade da sonda operar segundo um método de inspeção baseado na análise da variação da tensão elétrica induzida aos terminais das bobinas (U_{out}) durante um movimento de rotação de 360° da sonda sobre si mesma (Figura 2.20), em cada ponto da inspeção. Este procedimento permite aumentar a informação relativa a cada ponto do material, uma vez que cada passagem fornece não apenas um valor único do sinal, mas sim um conjunto de valores associados a cada posição angular da sonda [18, 11].

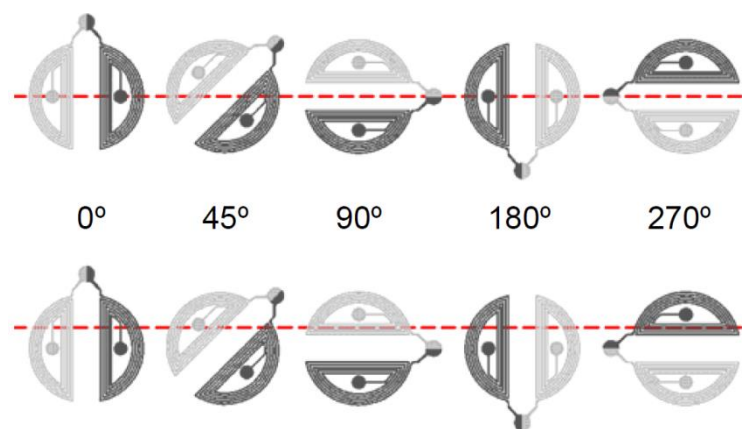


Figura 2.20 - Representação esquemática do método de inspeção baseado no movimento de rotação da sonda de 360° , com ou sem excentricidade relativamente à direção dos defeitos [27].

2.5.3 – Remote-Field Eddy Currents (RFEC)

Em geometrias tubulares, uma bobina de excitação coaxial com o eixo do tubo gera correntes induzidas na direção tangencial. A geometria tubular permite que as correntes induzidas anulem rapidamente o campo magnético da bobina de excitação, mas não protege de forma tão eficiente o campo magnético das correntes induzidas que são geradas sobre a superfície exterior do tubo. Por conseguinte, duas fontes de fluxo magnético são criadas no tubo: a fonte primária que é gerada pela própria bobina; e a fonte secundária que é gerada pelas correntes induzidas na parede do tubo (Figura 2.21). No interior do tubo, perto da bobina de excitação, a primeira fonte é dominante, mas para distâncias maiores a segunda fonte torna-se mais forte. Um sensor colocado nesta segunda região (campo afastado) deteta o fluxo de correntes através da parede do tubo. A amplitude e fase da tensão detetada dependerão da espessura da parede, da permeabilidade magnética e condutividade elétrica do material do tubo, e da possível presença de descontinuidades [29].

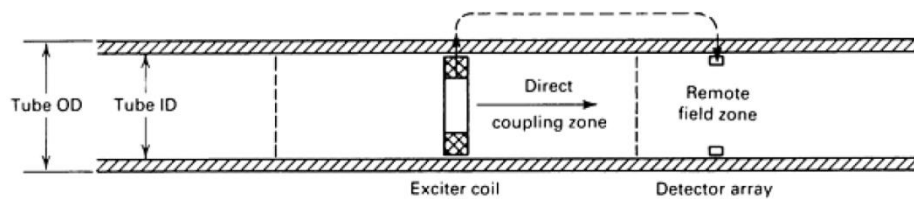


Figura 2.21 – Localização da *remote-field zone* em relação à bobina de excitação [29].

A sonda consiste numa bobina de excitação e num ou mais elementos sensores. Na maior parte das implementações a bobina de excitação é coaxial com o eixo do tubo. Os elementos de detecção podem ser enrolados com eixos paralelos ao eixo do tubo, embora as bobinas de detecção com eixos normais ao eixo do tubo possam também ser usadas para a análise de defeitos localizados. A técnica pode ser muito mais sensível a falhas localizadas utilizando múltiplas bobinas espaçadas em torno da circunferência interna, com eixos paralelos ao eixo do tubo [30]. A configuração da sonda está representada na Figura 2.22.

Usar a bobina de excitação, separada dos elementos de recepção, significa que a sonda opera naturalmente em modo de reflexão diferencial em vez de medir a impedância como nos ensaios tradicionais. Três condições devem ser atendidas para a sonda funcionar convenientemente:

- As bobinas de excitação e de recepção devem ser espaçadas com alguma distância ao longo do eixo do tubo (cerca de duas ou mais vezes o diâmetro do tubo) [31];

- Um sinal extremamente fraco no sensor deve ser amplificado com mínima geração de ruído e interferência com outros sinais. As bobinas de excitação e detecção podem ser constituídas por várias centenas de enrolamentos de fio de forma a maximizar a intensidade do sinal;
- Deve ser usada a frequência correta. A frequência de inspeção é geralmente tal que a profundidade de penetração (δ) é da mesma ordem de grandeza que a espessura da parede do tubo (tipicamente uma a três vezes a espessura).

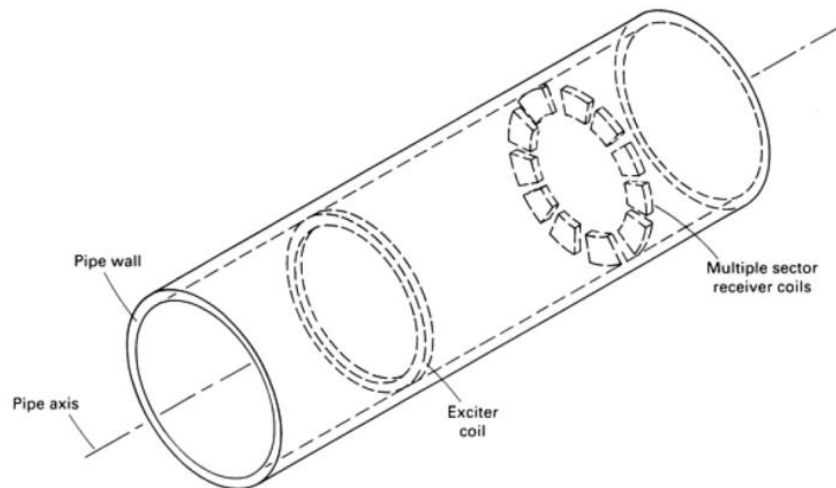


Figura 2.22 – Configuração com bobina de excitação e várias bobinas de recepção [29].

Quando estas condições forem atendidas, as mudanças de fase do sinal do recetor em relação à excitação são diretamente proporcionais à soma das espessuras de parede, no excitador e no recetor. Alterações localizadas na espessura da parede causam mudanças de fase e amplitude que podem ser usadas para detetar defeitos como fissuras, desgaste e corrosão [29].

Este método apresenta as seguintes limitações:

- **Frequência de operação** – A velocidade de inspeção é limitada pelas baixas frequências de operação [31]. Para muitas aplicações, a velocidade deve diminuir diretamente proporcional à resolução espacial exigida e inversamente com o quadrado da espessura da parede (a aproximação é baseada no modelo de efeito de pele e é geralmente válida quando a profundidade da pele é maior do que a espessura da parede).
- **Efeito da permeabilidade dos materiais** – Outra limitação é que tanto a amplitude como a fase do sinal são afetadas por alterações na permeabilidade do material a ser ensaiado. Este é provavelmente o fator limitativo na determinação da espessura da parede e da sensibilidade ao dano localizado em materiais ferromagnéticos. Esta

desvantagem pode ser superada através da aplicação de um campo magnético elevado para saturar o material, mas seria necessária uma sonda mais volumosa, mas menos flexível.

- **Efeito dos condutores externos na sensibilidade do sensor** – O sensor é também afetado pelo material condutor colocado em contacto com o exterior do tubo. O exemplo mais comum desta situação são os suportes dos tubos. Isto acontece porque o sensor é sensível a sinais provenientes do tubo exterior. Para os suportes dos tubos, ocorre um padrão característico que varia quando uma falha está presente. Apesar de detetar a falha, esta informação é gravada com uma sensibilidade reduzida.
- **Dificuldade em distinguir as falhas** – Medir o atraso da fase entre a excitação e receção e correlacionar a espessura da parede restante leva à não discriminação de falhas interiores com exteriores. Os sinais que indicam os defeitos exteriores e interiores são praticamente idênticos. No entanto, as sondas convencionais de correntes induzidas podem ser usadas para confirmar os defeitos no interior.

Devido a esta última limitação, foi desenvolvida uma técnica que combina o *Remote-Field* com as correntes induzidas pulsadas (PEC), *Pulsed Remote Field Eddy Current* (PRFEC) [32]. O método das correntes induzidas pulsadas (PEC) é uma nova tecnologia desenvolvida nos últimos anos, que tem demonstrado bons resultados na deteção de corrosão na estrutura de aeronaves [33, 34, 35]. A estrutura da sonda PRFEC é semelhante à convencional RFEC, como se representa na Figura 2.23, e consiste numa bobina de excitação e numa bobina de receção; a bobina de excitação é excitada com ondas pulsadas, geralmente ondas quadradas. A corrente transiente resultante na bobina de excitação induz correntes na parede do tubo, as quais estão associadas a impulsos magnéticos altamente atenuados que se propagam através da parede do tubo [36].

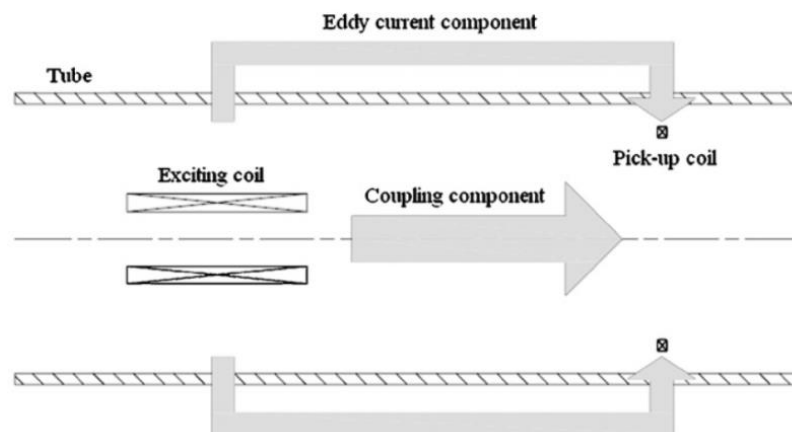


Figura 2.23 – Princípio de funcionamento da *Pulsed Remote Field Eddy Current* [32].

A tensão induzida na bobina de recepção tem dois componentes, um (*coupling component*) é induzido diretamente pelo campo magnético de excitação e o outro (*eddy current component*) é induzido pelo campo magnético das correntes induzidas [37]. No caso de excitação pulsada, a primeira componente existe apenas durante o aumento ou diminuição da corrente. Em qualquer outra altura, a componente da corrente induzida é lentamente atenuada e é dominante no sinal da resposta. Como resultado, a dissociação “temporária” é alcançada. Resultados experimentais mostram que a técnica PRFEC combina eficazmente as vantagens do RFEC e PEC, e tem uma elevada sensibilidade para a inspeção de tubos com defeitos internos e externos [32].

2.5.4 – Rotating Field Eddy Current (RoFEC)

Recentemente, Junjun Xin et. al. [38] desenvolveram um novo conceito de sonda denominado *Rotating field eddy current* que consiste numa sonda que gera um campo magnético que é rodado eletricamente no interior dos tubos, evitando assim a necessidade de rotação mecânica da sonda. O objetivo é a deteção de defeitos, na superfície interior de tubo, qualquer que seja a sua orientação.

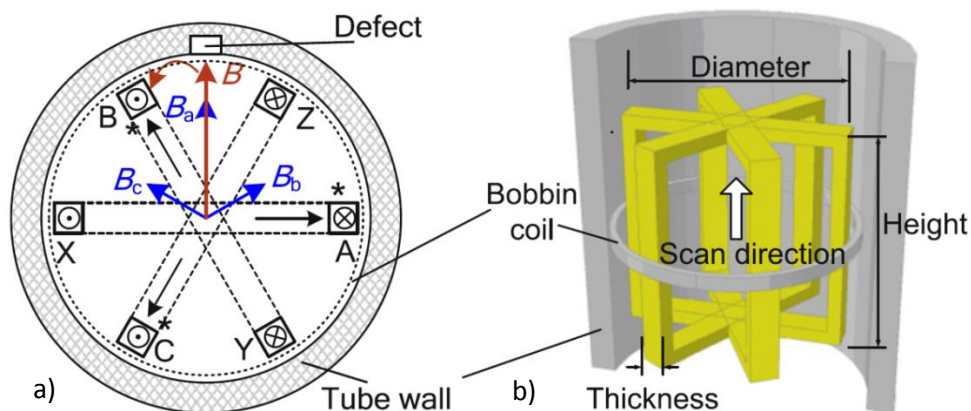


Figura 2.24 – *Rotating field eddy current*: a) Arranjo trifásico dos enrolamentos e b) Modelo 3D dos três enrolamentos de excitação e da bobina sensível [38].

A sonda utiliza com bobinas de excitação e bobinas sensíveis independentes, ou seja funciona no modo da reflexão. As bobinas de excitação são constituídas por três enrolamentos idênticos separados entre si de 120° com o mesmo eixo de rotação e são alimentados por corrente sinusoidal trifásica com amplitude, fase e frequência ajustável. Os componentes de campo de indução magnético B_a , B_b e B_c associados aos três enrolamentos AX, BY e CZ, respetivamente, são perpendiculares ao plano de cada um dos enrolamentos como se ilustra na Figura 2.24a. Os três componentes formam um campo de indução magnética total definido

por um vetor B com amplitude constante, que roda com a mesma frequência que a fonte de excitação.

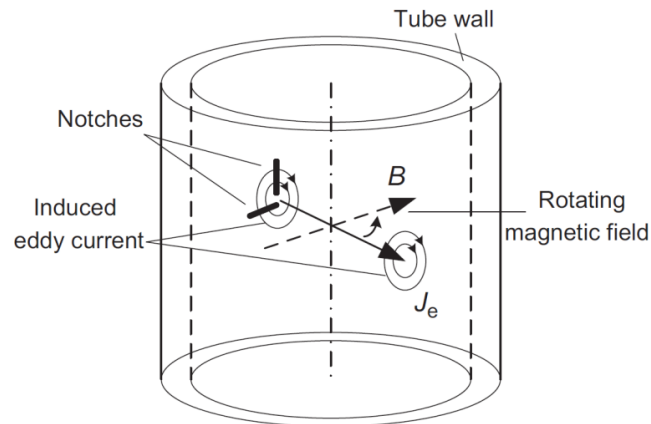


Figura 2.25 – CI na parede do tubo devido à rotação do campo magnético [38].

O campo magnético rotativo tem principalmente uma direção radial que irá induzir corrente na parede do tubo que irá correr numa direção circular em torno desse eixo como se representa na Figura 2.25, tornando a sonda sensível a defeitos com qualquer orientação. O sinal de resposta é detetado pela bobina de receção no centro como se representa na Figura 2.24b. Quando integrada num ciclo, a tensão induzida na bobina será zero se não existem defeitos na parede do tubo. A tensão induzida será apenas não nula na presença de um defeito. Adicionalmente, a fase da corrente induzida na bobina está correlacionada com a localização circunferencial do defeito. A Figura 2.26a mostra o contorno do campo de indução magnética em torno da parede do tubo num período de tempo para o caso sem defeito e a Figura 2.26b mostra o contorno do campo, na presença de um furo na parede.

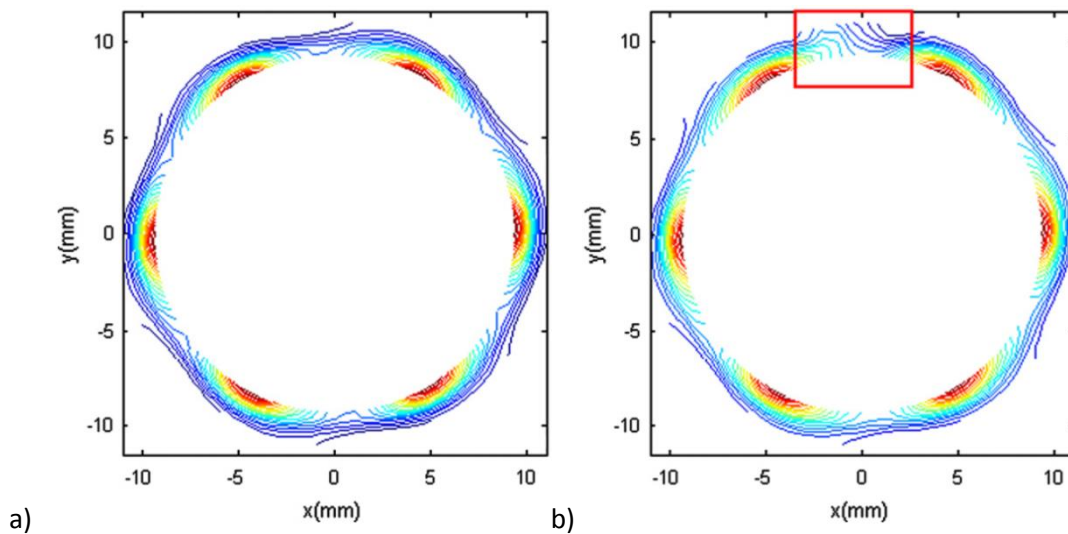


Figura 2.26 - Contorno do campo de indução magnética no plano xy:
a) sem defeito b) com defeito nos 90° [38].

O defeito perturba a corrente induzida e provoca uma variação do campo de indução magnética em torno da área do defeito na parede do tubo, como mostrado na Figura 2.26b. A sonda é sensível a defeitos, com comprimentos a partir dos 8 mm de comprimento, em todas as orientações na parede do tubo. O sinal da corrente induzida é diretamente proporcional à profundidade dos defeitos e a fase da corrente induzida na bobina está relacionada com a localização circumferencial dos defeitos na parede do tubo permitindo que a profundidade e a localização possam ambas ser estimadas a partir de um única linha de leitura de dados. A sonda é fácil de construir a baixo custo, com instrumentação simples e permite rápidas taxas de inspeção [38].

2.6 – Sondas Comerciais

Comercialmente, além das sondas convencionais, existem algumas sondas cujo objetivo é a detecção de defeitos orientados tangencialmente que permitem a inspeção de todo o comprimento do tubo a velocidades elevadas. Possibilitam ainda expor a posição circumferencial dos defeitos.

TXE – Olympus

Esta é uma recente série de sondas e é otimizada para a detecção de fissuras tangenciais, especialmente localizadas na superfície interior de tubos (Figura 2.27). As sondas de reflexão são constituídas por oito sensores circumferenciais independentes, sendo quatro bobinas de excitação e as outras quatro de recepção como é possível visualizar na Figura 2.28. A exibição de saída é uma imagem C-scan intuitiva (Figura 2.29), e a sonda também pode ser utilizada para inspecionar todo o comprimento do tubo, a velocidades muito elevadas (cerca de 1 m/s).



Figura 2.27 – Sonda Olympus TXE [19].

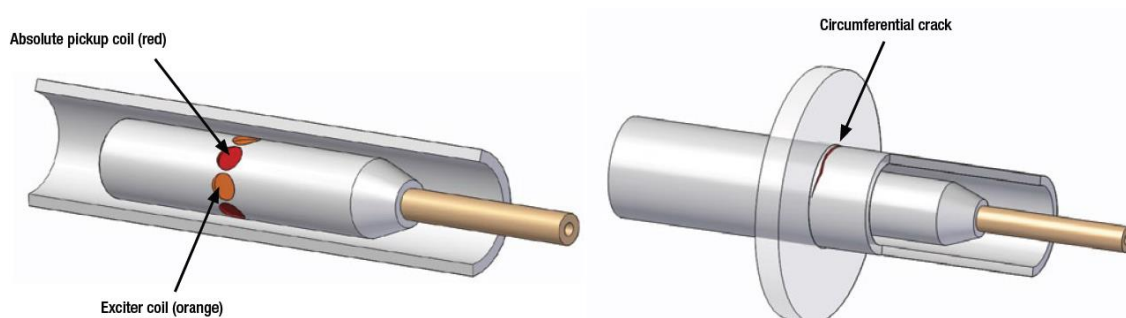


Figura 2.28 – Modelo esquemático da sonda TXE [19].

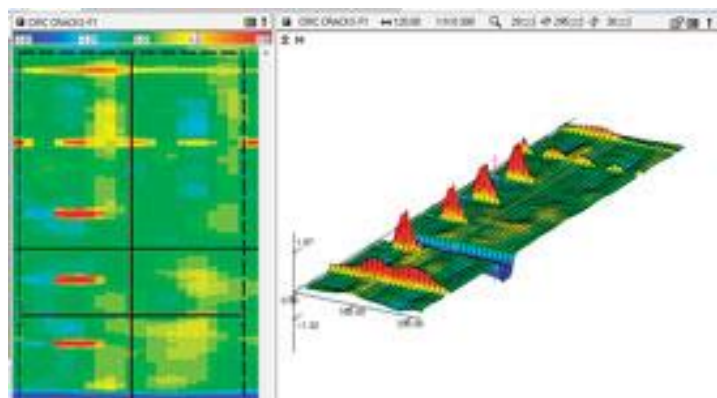


Figura 2.29 – Representação C-scan dos resultados [19].

O fabricante aponta como principais características desta sonda:

- Detecção de defeitos tangenciais em qualquer ponto do tubo.
- Inspeção de todo o comprimento do tubo com velocidade quase igual à velocidade padrão (1 m/s).
- Representação C-scan facilita a compreensão de sinais usando a opção MultiView C-scan.
- Chassis de titânio resistente e duradouro.
- Opção para usar até quatro frequências com mistura.

DefHi Probes – Eddyfi

A sonda Defhi da empresa Eddyfi é uma sonda de correntes induzidas de alta definição multiplexada concebida para a inspeção de tubos não-ferromagnéticos de condensadores, caldeiras e permutadores de calor (Figura 2.30). É apresentada como sendo especialmente eficaz para detetar defeitos tangenciais em tubos (uma das principais limitações das sondas de bobinas).



Figura 2.30 – Sonda DefHi – Eddyfi [39].

Constituída por várias bobinas como ilustrado na Figura 2.31 permite a localização circunferencial dos defeitos. A sonda também deteta e caracteriza outros tipos de defeitos como desgaste e corrosão. De acordo com o fabricante, a sonda Defhi permite uma sensibilidade superior para identificação de defeitos em qualquer orientação. Na Figura 2.32 encontra-se representada a visualização dos resultados de uma inspeção com a sonda. Esta

sonda permite a realização de uma inspeção numa só passagem no tubo com velocidades até 1m/s. No entanto, esta sonda é de elevada complexidade e com custos superiores a 10 mil euros.



Figura 2.31 – Representação do campo magnético e CI por uma bobina [39].

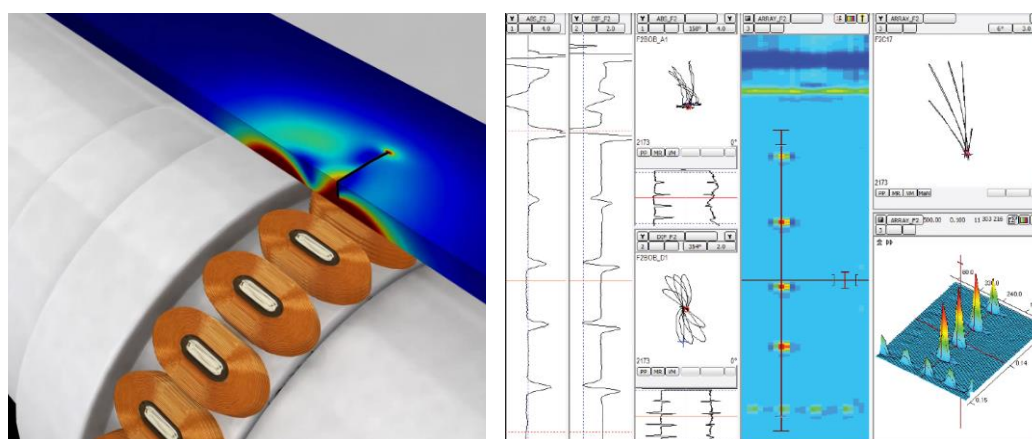


Figura 2.32 – Visualização de resultados [39].

2.7 – Síntese do Capítulo

Neste capítulo foi exposta a pesquisa bibliográfica efetuada no âmbito da dissertação, começando com um enquadramento histórico e a explicação sobre o que são os END e a sua utilidade. De seguida, apresentou-se as CI e os princípios físicos nos quais este fenómeno se baseia, para uma melhor compreensão dos fenómenos estudados neste trabalho.

Especificaram-se os fundamentos e limitações existentes no método de END por CI em geometrias tubulares e foram apresentadas as diferentes variantes do método e comparação das capacidades e limitações dessas mesmas variantes.

Foram ainda apresentadas sondas de correntes induzidas para geometrias tubulares existentes atualmente no mercado.

3 – REQUISITOS, CONCEÇÃO E PRODUÇÃO DAS SONDAS DE CORRENTES INDUZIDAS

3.1 – Introdução

Neste capítulo são apresentados os requisitos funcionais que as sondas a produzir devem satisfazer. Foram desenvolvidos vários conceitos de sondas sendo descritos os seus princípios de funcionamento, e explicada a sua finalidade. Descreve-se também as diferentes soluções construtivas adotadas e a sua produção.

3.2 – Análise da Especificidade dos END para o Tubo do ITER

Existe uma grande dificuldade na inspeção de componentes como o tubo do ITER referido anteriormente devido às reduzidas dimensões dos defeitos a detetar, à orientação dos mesmos e ao material do tubo.

Na Tabela 3.1 apresentam-se as especificidades, do tubo, a ter em conta no desenvolvimento deste trabalho. Na Figura 3.1 apresenta-se o perfil transversal do tubo com respetivas dimensões e também a sua vista isométrica. É também possível visualizar a posição dos defeitos padrão no tubo assim como uma soldadura T16.

Tabela 3.1 – Especificidades do componente do ITER.

Especificidade	Comentário
Defeitos de reduzida dimensão	Os defeitos que se pretendem detetar são de dimensão muito reduzida podendo passar despercebidos entre as correntes induzidas principalmente se tiverem a mesma direção das correntes.
Defeitos com qualquer orientação	Presentemente está a ser usada uma sonda convencional. Estas sondas são constituídas por bobinas enroladas segundo a direção tangencial do tubo, as correntes induzidas no seu interior terão a mesma direção e sentido contrário. As correntes induzidas, ao passarem por um defeito que seja perpendicular às mesmas (defeito axial), serão fortemente perturbadas acusando assim a existência de um defeito. No entanto, se o defeito estiver na mesma direção que as correntes (defeito tangencial), o mesmo pode passar despercebido.
Baixa condutividade elétrica (2,5% IACS)	A baixa condutividade do material implica a utilização de frequências mais altas na sua inspeção devido ao efeito de pele como referido no Capítulo 2.3.
Material não ferromagnético $\mu_r \approx 1$	Sendo o material não ferromagnético implica uma permeabilidade magnética aproximadamente igual à do ar. Sendo os defeitos constituídos por ar a diferença na permeabilidade será muito reduzida provocando uma variação no campo magnético muito baixa.

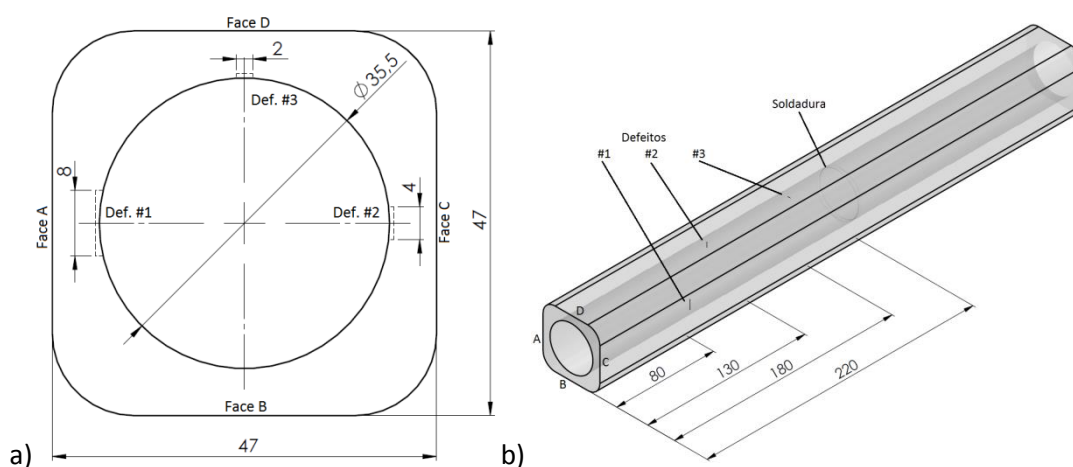
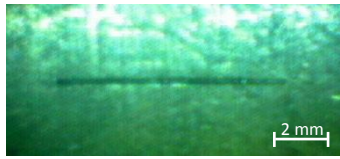
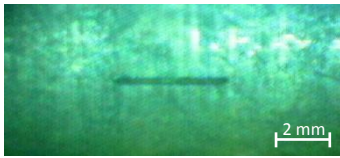
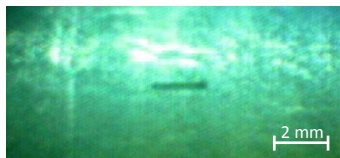


Figura 3.1 – Tubo do ITER a) Vista de perfil b) Vista isométrica.

Na Tabela 3.2 estão caracterizados os defeitos presentes do tubo. Os três defeitos encontram-se orientados na direção tangencial (paralelos ao topo). Foi realizada uma inspeção visual remota (IVR) com auxílio de um endoscópio, da marca EASYVIEW, cujo resultado é também apresentado.

Tabela 3.2 – Defeitos padrão presentes no tubo do ITER.

Designação do defeito	Face	Distância ao topo	Dimensão (mm)			Foto
			Comp.	Esp.	Profund.	
#1	A	130	8	0,2	0,5	
#2	C	80	4	0,2	0,5	
#3	D	180	2	0,2	0,5	

O material do tubo do ITER é um aço inox 316LN (JK2LB) e as suas propriedades mecânicas são apresentadas na Tabela 3.3. Na Tabela 3.4 apresenta-se a sua composição química e, na Tabela 3.5, as propriedades elétricas.

Tabela 3.3 – Propriedades mecânicas do material.

Propriedades	Valor
Dureza Brinell	123
Dureza Rockwell C	70
Dureza Vickers	129
Tensão de rotura	505 MPa
Tensão limite de cedência	215 MPa
Módulo de elasticidade	193 GPa
Coeficiente de Poisson	0,29
Tensão de corte	77 GPa

Tabela 3.4 – Composição química do material.

Carbono	Crómio	Ferro	Manganês	Níquel	Azoto	Fósforo	Silício	Enxofre
0,03 %	16 - 18 %	61 – 71 %	2 %	10 – 14 %	0,10 – 0,16 %	0,045 %	1 %	0,03 %

Tabela 3.5 – Propriedades elétricas do material.

Permeabilidade magnética	Condutividade elétrica teórica	Condutividade elétrica medida
1,02	$1,39 \times 10^6 S/m$	$1,55 \times 10^6 S/m$

3.3 – Requisitos Funcionais da Sonda

Tendo em conta as especificações técnicas do componente a inspecionar, nomeadamente, material, geometria e defeitos, descritas anteriormente, foram definidos os requisitos funcionais que a sonda deve satisfazer tendo em vista aumentar a fiabilidade da inspeção, comparativamente às soluções atualmente existentes. A Tabela 3.6 resume os requisitos estabelecidos.

Tabela 3.6 – Requisitos funcionais das sondas.

Requisito funcional	Comentário
Sensibilidade e limiar de detetabilidade	As sondas devem apresentar uma sensibilidade na deteção de defeitos de reduzida dimensão, com uma relação sinal/ruído cuja qualidade não ofereça dúvidas relativamente a todos os defeitos descritos para o tubo do ITER.
Capacidade de deteção em qualquer orientação	As sondas devem apresentar uma configuração geométrica das bobinas de excitação e receção de tal forma que as CI sejam suficientemente perturbadas, mesmo na presença de defeitos com orientação tangencial.
Possibilidade de localização do defeito segundo as coordenadas axiais e tangenciais	As sondas devem ser permitir conhecer a posição axial do defeito o que é facilmente detetável pelo sinal produzido. Devem também permitir conhecer a sua posição tangencial.
Solução construtiva económica	Presidem a este critério questões estratégicas de eventual comercialização do equipamento, assim como constrangimentos orçamentais existentes no âmbito do trabalho.

3.4 – Desenvolvimento Conceptual da Sonda

No desenvolvimento conceptual da sonda foram consideradas sete configurações distintas que se descrevem de seguida.

3.4.1 – Configuração 1 – Sonda do Tipo Convencional

A primeira configuração (a do tipo sonda convencional) é constituída por duas bobinas coaxiais com o tubo como se representa na Figura 3.2. Esta disposição é ideal para a detecção de defeitos axiais, no entanto, a sua capacidade de detecção de defeitos tangenciais é reduzida.

Esta sonda pode funcionar em diversos modos de acordo com a ligação dos terminais das bobinas. Na Figura 3.2b é possível visualizar o diagrama esquemático da sonda. Uma abordagem consiste em excitar as duas bobinas de preferência de maneira a produzirem o campo magnético na mesma direção produzindo, assim, o dobro do campo e, consequentemente, de correntes induzidas, efetuando a leitura em *bridge* diferencial. Outra alternativa consiste em excitar uma bobina e medir a variação de impedância na outra. Em alternativa pode-se adotar uma abordagem absoluta excitando e lendo a mesma bobina. Estas diferentes formas de funcionamento encontram-se descritas mais detalhadamente no ponto 6.3.2.

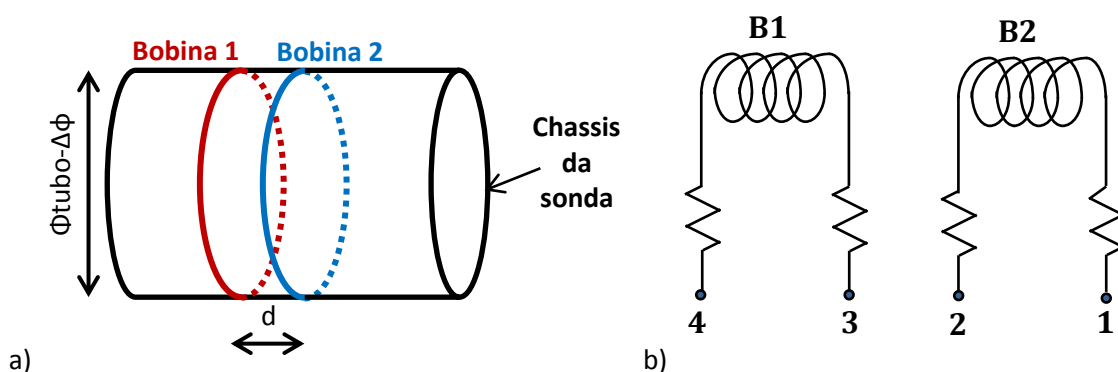


Figura 3.2 – 1ª Configuração – Convencional.
a) Diagrama esquemático; b) Esquema das bobinas.

Esta configuração permitiu uma comparação com a sonda comercial usada presentemente. É um ponto de partida em que se esperava um sinal semelhante ao obtido com a sonda comercial. Não tem como objetivo aumentar o limiar da detetabilidade ou a sua sensibilidade. A capacidade de detecção dos defeitos tangenciais será a pior dentro das orientações possíveis. A posição axial do defeito será conhecida pelo sinal da impedância ao longo do comprimento do tubo caso o mesmo seja detetado. No entanto, a sua posição tangencial será impossível de

obter com esta configuração. Não são portanto esperadas melhorias substanciais face à sonda comercial.

3.4.2 – Configuração 2 – Sonda com Três Bobinas Tangenciais

A seguinte configuração consiste numa sonda com três enrolamentos tangenciais. É constituída por uma bobina de excitação coaxial com o tubo e duas bobinas de receção como se ilustra na Figura 3.3. Esta disposição é favorável para a deteção de defeitos axiais, a sua capacidade de deteção de defeitos tangenciais é mais reduzida.

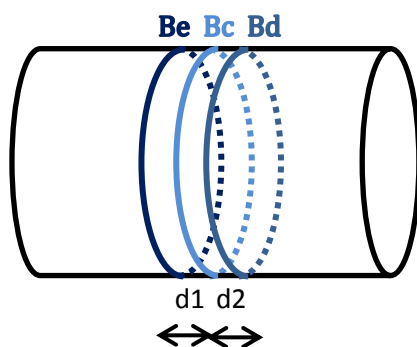


Figura 3.3 – 2ª Configuração – Três bobinas tangenciais.

Esta sonda pode funcionar em modo diferencial. Foram experimentadas duas abordagens: uma abordagem consistiu em excitar uma bobina de uma extremidade e ler as outras duas em diferencial; a outra abordagem consistiu em excitar a bobina central e ler as das extremidades em diferencial. Em ambos os casos trata-se de um modo de funcionamento do tipo reflexão diferencial. As bobinas foram enroladas no mesmo sentido permitindo, de acordo com os terminais ligados, saber quando se está a somar o campo magnético produzido pelas mesmas. Sendo o objetivo a leitura em diferencial, as duas bobinas de leitura serão ligadas de maneira a que os enrolamentos fiquem em sentidos opostos. Com esta configuração pretende-se perceber se com este modo de reflexão a sensibilidade da sonda é melhorada.

3.4.3 – Configuração 3 – Excitação axial com leitura em bobinas espirais trapezoidais planas

A terceira configuração consistiu numa bobina de excitação enrolada na direção axial sendo a receção realizada com recurso a várias bobinas em torno da sonda com geometria trapezoidal (Figura 3.4). As bobinas de receção funcionam em modo reflexão absoluto o que possibilitará uma sensibilidade superior e consequentemente um aumento do limiar de detetabilidade. Podem também funcionar em reflexão diferencial ligando duas ou mais bobinas em série. Esta geometria espiral trapezoidal permite que a leitura seja efetuada com uma bobina cuja orientação dos filamentos não é constante facilitando assim a deteção de um

desvio das correntes induzidas mais facilmente. Sendo trapezoidais permitem cobrir todo o perímetro da sonda de bobinas, não existindo assim uma posição de sombra. Esta disposição permitirá ainda obter a localização circunferencial do defeito. Com a excitação axial, a capacidade de deteção de defeitos tangenciais será a favorecida pois, as correntes induzidas terão uma orientação transversal ao defeito sendo assim mais perturbadas.

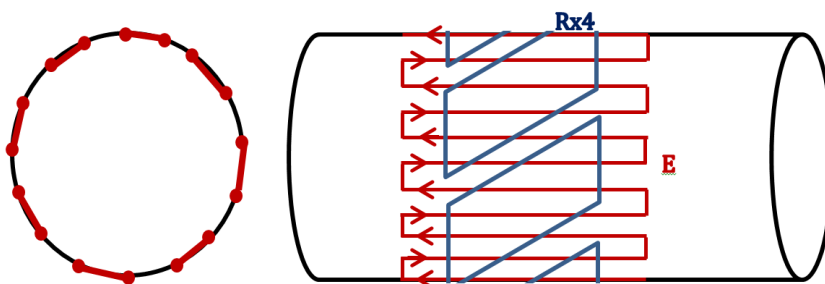


Figura 3.4 – 3ª Configuração – Excitação axial com leitura trapezoidal.

Os enrolamentos de excitação são enrolados com sentidos contrários entre espiras consecutivas facilitando a construção da sonda. Caso fossem todos no mesmo sentido seria necessário fazer o retorno de cada enrolamento pelo centro da sonda o que além de dificultar a sua produção poderia ter efeitos indesejáveis no seu funcionamento. Os enrolamentos axiais devem ter um comprimento superior à largura das bobinas espirais trapezoidais para garantir que na zona de leitura, as correntes induzidas estão estabilizadas.

3.4.4 – Configuração 4 – Excitação tangencial com leitura em bobinas espirais trapezoidais

A quarta configuração consistiu numa bobina de excitação igual à da primeira configuração e um conjunto de bobinas de receção idênticos aos da terceira configuração, como se ilustra na Figura 3.5. Desta maneira, a deteção de defeitos axiais será favorecida e ainda permitirá conhecer a sua posição circunferencial.

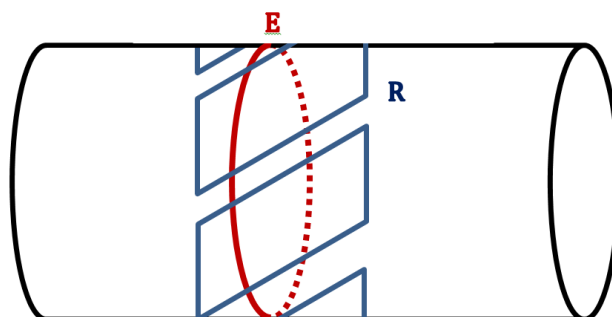


Figura 3.5 – 4ª Configuração – Excitação tangencial e leitura trapezoidal.

3.4.5 – Configuração 5 – Excitação e leitura com bobinas espirais trapezoidais planas

A quinta configuração consistiu em várias bobinas trapezoidais, do género das usadas como receção na 3ª e na 4ª configuração, que funcionarão como excitação e receção simultaneamente, ou seja, modo absoluto. Com esta configuração pretende-se detetar defeitos com qualquer orientação.

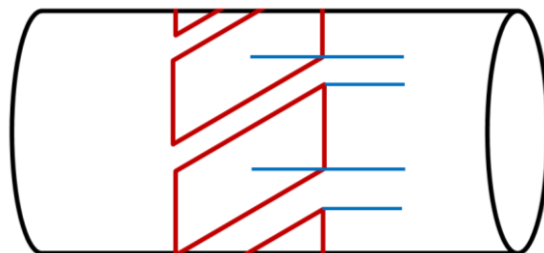


Figura 3.6 – 5ª Configuração – Excitação e leitura em espiral trapezoidal.

3.4.6 – Configuração 6 – Excitação e leitura com bobinas espirais circular planas

Nesta configuração, muito semelhante à anterior, as bobinas funcionam simultaneamente como excitação e receção, mas adotou-se uma geometria diferente, constituída por várias bobinas espirais circulares (ver Figura 3.7). São usados dois planos com bobinas com o objetivo de cobrir todo o perímetro pois, um defeito axial entre duas bobinas consecutivas facilmente passaria despercebido. Com esta geometria as correntes induzidas geradas têm a mesma direção das bobinas o que permite que eventualmente a orientação do defeito seja tal que as perturbe fortemente. É ainda possível efetuar uma leitura diferencial entre duas bobinas diferentes.

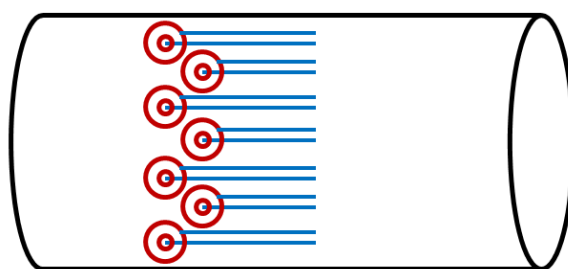


Figura 3.7 – 6ª Configuração – Excitação e leitura em espiral circular.

3.4.7 – Configuração 7 – Excitação helicoidal com leitura em bobinas espirais trapezoidais

A sétima configuração consistiu numa bobina de excitação enrolada em espiral. A receção também será efetuada com recurso a bobinas espiral trapezoidais onde cada uma terá o seu centro coincidente com a excitação como se ilustra na Figura 3.8. Na Figura 3.9 ilustra-se um pormenor do enrolamento da bobina de excitação sendo um enrolamento (ao fim de uma volta, o fio terá que voltar ao início do enrolamento), o que pode algumas perturbações na

leitura do sinal nesta zona. De notar que na Figura 3.9 apenas está representada a bobina de excitação. A bobina espiral trapezoidal sensível terá o seu centro coincidente com o enrolamento de excitação e o seu objetivo é o mesmo que nas configurações anteriores: preencher o perímetro do tubo de bobinas não deixando posições de sombra e aumentar a sensibilidade da leitura para diferentes orientações de defeito.

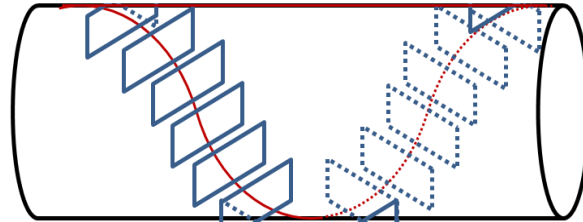


Figura 3.8 – 7ª Configuração – Excitação helicoidal e leitura espiral trapezoidal.

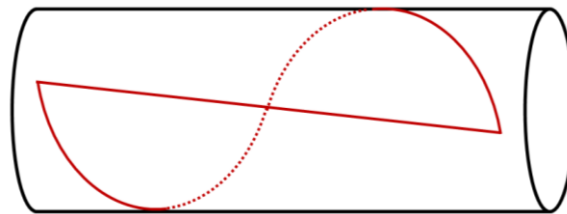


Figura 3.9 – 7ª Configuração com rotação de 90°.

3.4.8 – Síntese

Foram concebidas diferentes configurações de sondas com o objetivo de satisfazer os requisitos definidos. As configurações 1, 2 e 6 são réplicas de sondas já existentes. As configurações restantes são as sondas inovadoras desenvolvidas.

Sensibilidade e limiar de detetabilidade

Conforme referido a configuração 1 é um ponto de partida em que se espera um sinal semelhante ao obtido com a sonda comercial e não tem como objetivo aumentar o limiar de detetabilidade. Da configuração 2 espera-se um pouco mais sensibilidade e uma melhoria na relação sinal/ruído. As restantes configurações com a leitura realizada por bobinas espirais planas em substrato flexível espera-se uma sensibilidade superior que não ofereça dúvidas no sinal obtido.

Capacidade de deteção de defeitos em qualquer orientação

Todas as configurações devem, melhor ou pior, detetar defeitos em qualquer orientação no entanto, existem configurações mais adequadas a certas orientações de defeitos. Na Tabela 3.7 apresenta-se um resumo do tipo de defeitos a que cada configuração é mais sensível e os possíveis modos de funcionamento.

Tabela 3.7 – Modos de funcionamento e orientações de defeitos aplicáveis a cada conceção.

Configuração	Defeitos Tangenciais	Defeitos Axiais	Defeitos Oblíquos	Modo Diferencial	Modo Absoluto	Modo Reflexão
1		x	x		x	x
2		x	x	x	x	x
3	x		x	x		x
4		x	x	x		x
5	x	x	x		x	
6	x	x	x		x	
7	x	x	x	x		x

Possibilidade de localização do defeito segundo coordenadas axiais e tangenciais

Todas as configurações permitem conhecer a posição axial do defeito através da variação da impedância ao longo do comprimento do tubo como será constatado no Capítulo 6. A posição tangencial do defeito apenas será possível nas configurações que têm bobinas sensíveis em substrato flexível. Portanto, as configurações 1 e 2 não cumprem este requisito. A precisão da localização tangencial do defeito, no entanto, depende de alguns pormenores. A posição tangencial é conhecida através de uma alteração da impedância medida numa das bobinas (ou duas), sabendo a posição tangencial desta bobina é conhecida a posição do defeito. Logo, quanto mais bobinas sensíveis conter o substrato, mais precisa será esta localização. Por exemplo, na Tabela 3.8 a bobina vAx16 permitirá uma precisão da localização superior à vAx4.

Solução construtiva económica

Todas as sondas são constituídas por um chassis de acrílico, um varão roscado e bobinas. As bobinas produzidas em substrato flexível têm um custo na ordem dos centavos assim como as constituídas por apenas fio de cobre. A solução construtiva é muito económica podendo certos componentes ser até descartáveis como será aprofundado no ponto seguinte.

3.5 – Projeto, Produção e Caracterização das Sondas

As sondas são basicamente constituídas por bobinas, um chassis cilíndrico de PMMA (polimetil-metacrilato) e um varão roscado para a sua fixação ao componente móvel da mesa de ensaios. Os chassis de acrílico foram torneados com 34,4 mm de diâmetro.

Foram produzidas algumas sondas espirais planas em substrato flexível de Kapton [40] com diferentes geometrias e número de espiras. Para se produzir estas sondas, foi necessário realizar o projeto, que inclui o desenho das máscaras com as diferentes configurações das

sondas. As máscaras são colocadas sobre verniz fotossensível que reveste o cobre dos substratos, e é sujeito a uma exposição ultravioleta que degrada as zonas não cobertas pela máscara das sondas. O substrato passa por um banho de soda cáustica e finalmente por uma solução de perclorato de ferro onde se dá o *etching* que conduziu ao resultado final.

Estas máscaras representam a geometria da sonda, onde são incorporadas as pistas, os espaços em vazio e os furos onde se ligam os terminais que servem para fazer a ligação dos cabos para excitar a sonda e para receber o sinal. Para a realização das máscaras recorreu-se ao *Software* Altium Designer [41].

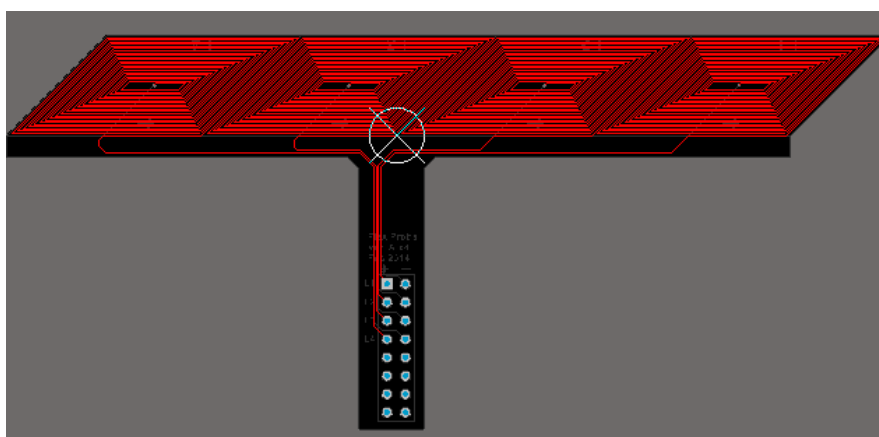



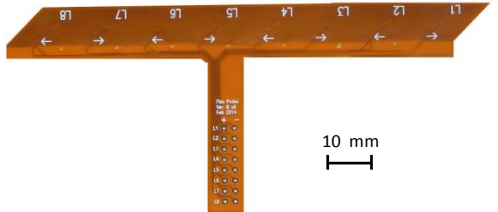
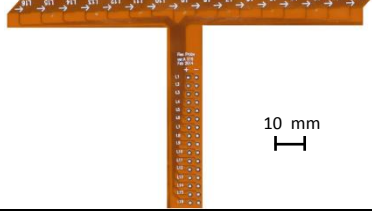
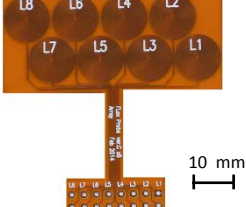
Figura 3.10 – Sonda criada no *software* Altium Design.

Na Figura 3.10, mostra-se uma das sondas criada, a geometria da sonda encontra-se representada pela cor vermelha que é constituída por cobre. As zonas que se encontram a negro significam que o cobre foi retirado, ficando apenas o substrato. As zonas circulares azuis são furos metalizados revestidos a cobre, para que seja possível realizar as ligações que vão permitir excitar a sonda e adquirir o seu sinal.

A largura das espiras de todas as bobinas é de 150 μm , assim como o espaçamento entre elas. O cobre tem uma espessura de 25 μm . Na Tabela 3.8 encontram-se as quatro variantes fabricadas. As primeiras três variantes são em tudo semelhantes à exceção no número de espiras das bobinas, o que, consequentemente, altera o seu tamanho e o número de bobinas necessárias para cobrir o perímetro do tubo.

A bobina vAx2x8 tem uma particularidade que consiste no enrolamento em ambos os lados do substrato no mesmo sentido, aumentando assim o número de espiras para o dobro. A bobina vCx8 não permitirá cobrir todo o perímetro do tubo, no entanto, para testar o seu funcionamento em condições laboratoriais isso não é um requisito.

Tabela 3.8 – Bobinas fabricadas em substrato flexível.

Nomenclatura	Nº de bobinas	Nº de espiras	Geometria	Figura
vAx4	4	21	Espiral trapezoidal	
vAx2x8	8	14	Espiral trapezoidal	
vAx16	16	6	Espiral trapezoidal	
vCx8	8	14	Espiral circular	

Na Figura 3.11 encontra-se caracterizado o varrimento em frequência da impedância da bobina vAx2x8 onde se pode constatar que as frequências de ressonância se encontram para cima dos 5 MHz.

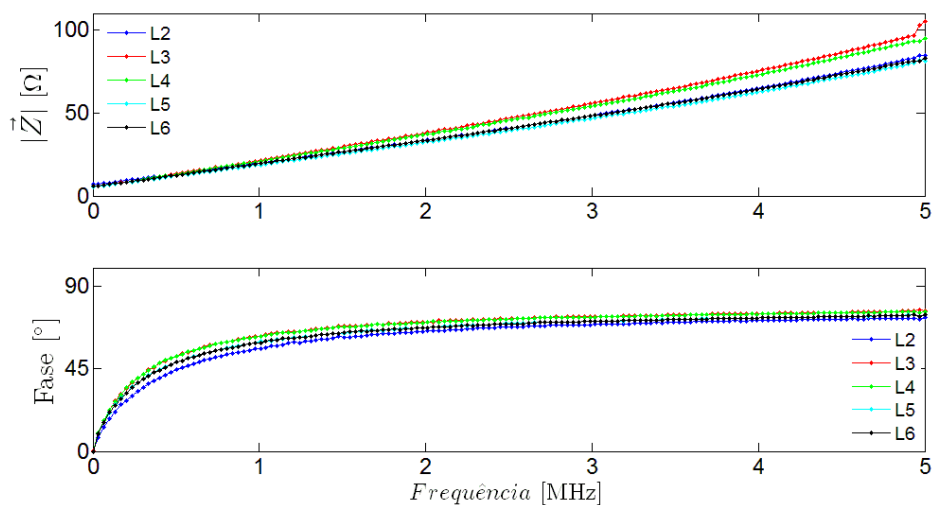


Figura 3.11 – Varrimento em frequência de 5 bobinas da sonda trapezoidal vAx2x8 no interior do tubo do ITER

No Anexo 2 encontra-se os restantes resultados da caracterização das bobinas da Tabela 3.8. Estas caracterizações foram efetuadas com recurso a um medidor de impedâncias HIOKI 3532-50 LCR HiTESTER) [42] e foram realizadas com o objetivo de conhecer as suas frequências de ressonância.

De notar que em todas as sondas foi enrolada sobre as bobinas uma fita-cola de *teflon* por quatro razões distintas; melhorar o acoplamento mecânico entre a sonda e o tubo garantindo assim a concentricidade entre ambos; o baixo coeficiente de atrito entre a fita e o tubo o que permite um deslocamento da sonda no seu interior mais suave, a fixação das bobinas no chassis, especialmente as bobinas em substrato flexível e para proteger as mesmas. Cada unidade destas bobinas em substrato flexível tem um custo da ordem dos centímetros de euro e o seu acoplamento a um chassis é simples o que pode ser usado como elemento descartável. Sendo a elaboração da máscara realizada no *software* referido, é possível, com bastante facilidade, alterar a geometria ou número de espiras da bobina e acoplar à sonda, a mais indicada para a inspeção em curso.

3.5.1 – Configuração 1 – Convencional

Esta configuração consiste no enrolamento de dois fios em torno de dois rasgos no chassis de acrílico. Foram torneados dois rasgos com 1,5 mm de profundidade e 0,8 mm de largura e foi enrolado o fio com 54 espiras. O fio utilizado tem 0.13 mm de diâmetro e a caracterização da sonda pode ser visualizada na Figura 3.12b.

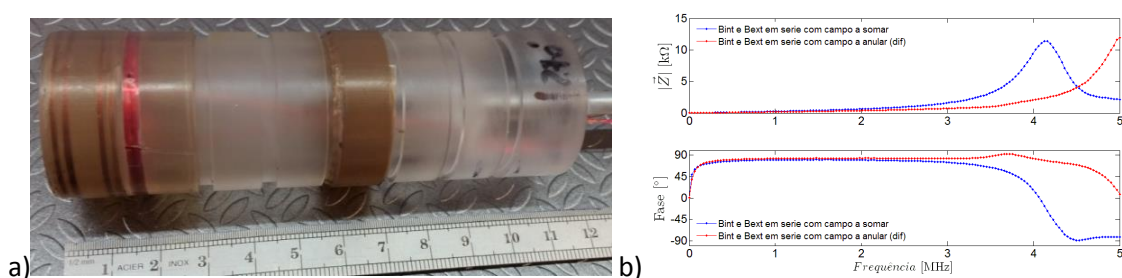


Figura 3.12 – a) 1ª Configuração sonda convencional; b) Varrimento em frequência das bobinas no interior do tubo do ITER.

Nesta caracterização foi detetada uma frequência de ressonância nos 4 MHz com uma resistência estática de cerca de 10 $k\Omega$. As restantes caracterizações encontram-se no Anexo 3. Para confirmar a direção do campo de cada bobina foram medidos os campos produzidos por cada uma com recurso a uma sonda de Hall. Na Figura 3.12a pode ser visualizado o resultado final: as duas bobinas utilizadas encontram-se do esquerdo da figura.

3.5.2 – Configuração 2 – Sonda com Três Bobinas Tangenciais

Esta configuração, à semelhança da primeira, também consiste em bobinas enroladas em rasgos presentes do chassis de acrílico. Neste caso, foram utilizados 3 rasgos com 1,5 mm de profundidade e 0,8 mm de largura. Os rasgos foram espaçados de 0,8 mm entre si. Foi enrolado, em cada rasgo, um fio de 0,224 mm de diâmetro o que, permitiu 32 espiras cada enrolamento. Na Figura 3.13a apresenta-se uma vista de pormenor dos três enrolamentos. Na Figura 3.13b apresenta-se a vista geral da sonda, sendo possível visualizar, na extremidade do varão roscado, oposta à sonda, as duas porcas manuais utilizadas para fixação da sonda à mesa de ensaios.

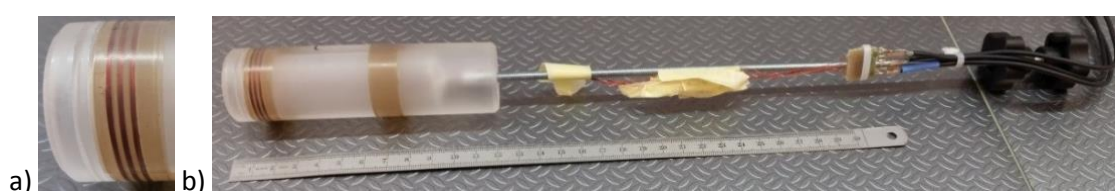


Figura 3.13 – 2ª Configuração – a) Vista de pormenor dos enrolamentos b) Vista geral.

A caracterização desta bobina encontra-se no Anexo 4 que permitiu conhecer uma frequência de ressonância nos 3 MHz. Para confirmar a direção do campo de cada bobina foram medidos os campos produzidos por cada uma com recurso a uma sonda de *Hall*.

3.5.3 – Configuração 3 – Excitação axial com leitura em bobinas espiral trapezoidais

Esta configuração consiste em fazer a excitação com recurso a um enrolamento na direção axial e a leitura com bobinas espiral trapezoidais em substrato flexível. No chassis em acrílico foram fresados 16 rasgos, igualmente espaçados, com um ângulo de 22,5° entre cada rasgo, como pode ser observado na Figura 3.14a.

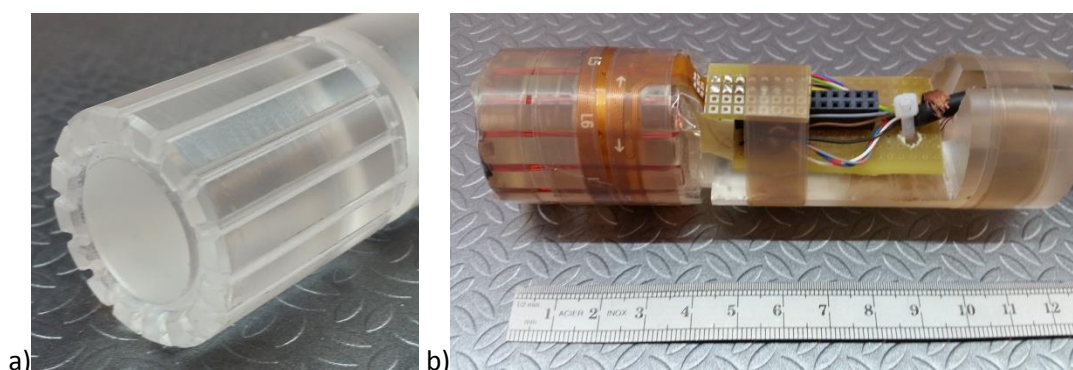


Figura 3.14 – a) Pormenor do chassis da 3ª configuração b) 3ª configuração – Excitação axial com leitura na bobina espiral trapezoidal plana (vAx2x8).

Nestes rasgos foi enrolado o fio com 0,224 mm de diâmetro de tal maneira que num rasgo o fio é enrolado numa direção e no imediatamente seguinte na direção contrária. Foi possível

fazer 8 enrolamentos nesta sonda. Por cima destes enrolamentos foi colocada a bobina vAx2x8 descrita na Tabela 3.8 fazendo coincidir o centro das bobinas trapezoidais com os rasgos axiais. Desta forma, fez-se coincidir a interface entre duas bobinas trapezoidais consecutivas com um enrolamento axial como se pode perceber na Figura 6.20. Na Figura 3.14b é possível visualizar a sonda completa. A caracterização da bobina de excitação encontra-se no Anexo 5 que permitiu conhecer uma frequência de ressonância nos 3,9 MHz.

3.5.4 – Configuração 4 – Excitação tangencial com leitura em bobinas espirais trapezoidais

Esta configuração consiste em fazer a excitação com recurso a um enrolamento na direcção tangencial, como nas duas primeiras configurações e a leitura com bobinas espiral trapezoidais planas em substrato flexível. Para o efeito foram produzidas três sondas. Para a excitação das sondas utilizou-se um enrolamento tangencial com fio de 0,224 mm de diâmetro. Numa das sondas utilizou-se um enrolamento tangencial de 15 espiras e uma bobina trapezoidal em substrato flexível vAx2x8 (ver Tabela 3.8). Esta bobina trapezoidal é colocada sobre a bobina de excitação tangencial fazendo coincidir o centro das várias bobinas com o enrolamento tangencial. É possível visualizar o processo de montagem da sonda na Figura 3.15.



Figura 3.15 – 4ª Configuração – Excitação tangencial com leitura trapezoidal (vAx2x8).
a) Chassis; b) Chassis com enrolamento tangencial; c) Chassis com bobinas trapezoidais sobre o enrolamento de excitação.

Foi produzida outra sonda segundo o mesmo conceito, com 80 enrolamentos tangenciais para a excitação e foi usada, para a leitura, a bobina vAx4 caracterizada na Tabela 3.8. Esta sonda encontra-se representada na Figura 3.16.

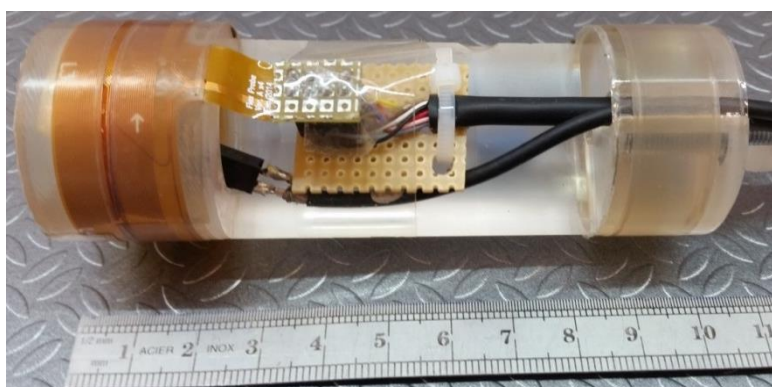


Figura 3.16 – 4ª Configuração – Excitação tangencial com leitura trapezoidal (vAx4).

Esta bobina trapezoidal devido ao seu tamanho superior poderá perder sensibilidade pelo que foi usado um enrolamento com mais espiras. Aumentando as espiras gera-se um campo magnético mais intenso que por sua vez aumenta a intensidade das correntes induzidas.

Com o objetivo de perceber a influência do número de espiras no enrolamento de excitação foi criada outra sonda constituída por três enrolamentos de excitação independentes. Estes enrolamentos estão enrolados no mesmo rasgo, uns por cima dos outros sendo que o interior tem 20 espiras, e o intermédio e o exterior têm ambos 10 espiras. Desta maneira, é possível numa só sonda ter uma excitação com 10, 20 e 40 espiras de acordo com a ligação, e, serie, efetuada. Para a leitura foram utilizadas, separadamente, duas bobinas trapezoidais diferentes: a vAx16 ilustrada na Figura 3.17 e a vAx2x8 (ver Tabela 3.8). A caracterização das bobinas de excitação encontra-se no Anexo 6.

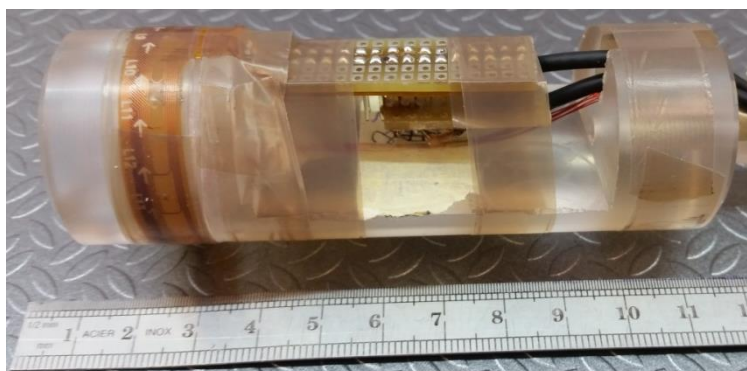


Figura 3.17 – 4ª Configuração – Excitação tangencial com leitura trapezoidal (vAx16).

3.5.5 – Configuração 5 e 6 – Excitação e leitura com bobinas espirais

Estas duas configurações consistem em excitar e ler a mesma bobina em substrato flexível (modo absoluto). Para tal, o chassis é constituído por um varão em acrílico com uma caixa para a colocação das ligações das sondas (ver Figura 3.18b). Para a quinta configuração foi usada a bobina vAx2x8 e para a sexta foi usada a bobina espiral circular (ver Figura 3.18a).

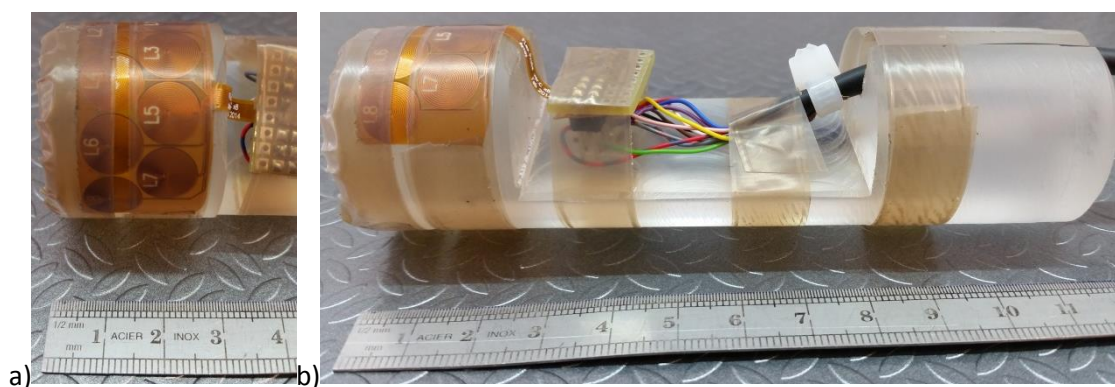


Figura 3.18 – 6ª Configuração – Leitura e Excitação com espirais
a) Vista de pormenor b) Vista geral.

3.5.6 – Configuração 7 – Excitação helicoidal com leitura em bobinas espiral trapezoidais

Esta sonda foi baseada na sétima configuração mas, com algumas diferenças construtivas. Por uma questão de facilidade de construção e diminuição com comprimento total da sonda foi feito o enrolamento com 180° em vez dos 360° . O retorno é feito simetricamente como se ilustra na Figura 3.19. Em termos de ensaios não é espectável haver alguma discrepância pois apenas são usadas duas bobinas numa zona central, longe de perturbações causadas (por exemplo, pelos dois vértices presentes nas extremidades). O enrolamento foi feito com fio de diâmetro 0,224 mm e com 15 espiras o qual está representado na Figura 3.19c.

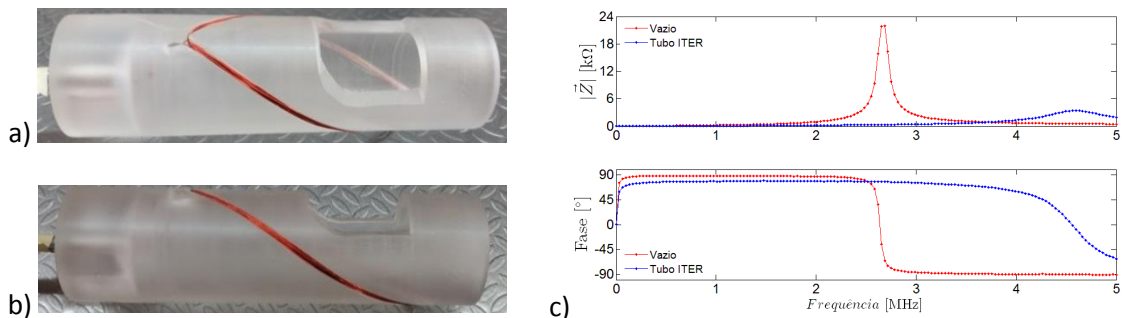


Figura 3.19 – 7ª Configuração – Excitação helicoidal (antes da instalação da bobina sensível)
a) Rotação de 0° b) rotação de 90° c) Varrimento em frequência do enrolamento.

Sobre o enrolamento helicoidal foi colocada a bobina vAx2x8 da Tabela 3.8 fazendo coincidir o centro da cada uma das bobinas trapezoidais com o enrolamento helicoidal. O perímetro de leitura fica restringido a menos de 180° (ver Figura 3.20).

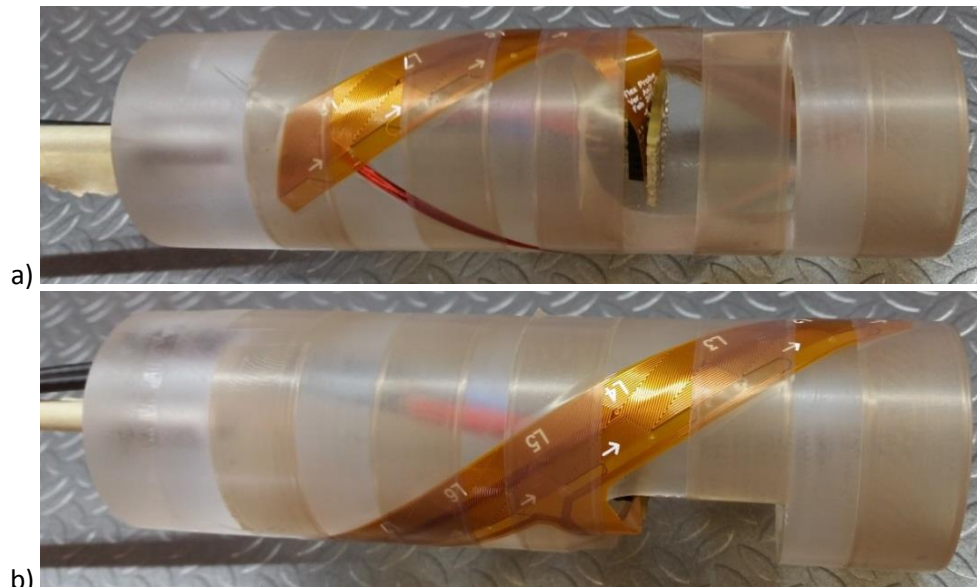


Figura 3.20 – 7ª Configuração – Excitação helicoidal com leitura trapezoidal (vAx2x8)
a) Rotação de 0° b) rotação de 90° .

3.6 – Suporte e Montagem das Sondas

No chassis das sondas existe um furo roscado central onde é fixo um varão roscado que faz de interface com a mesa de ensaios. Na extremidade oposta do varão estão duas porcas manuais que fazem a fixação do varão ao rasgo de uma peça denominada por L, conforme ilustrado na Figura 3.21 onde se pode observar a fixação da sonda na mesa de ensaios com os respetivos componentes envolvidos. Este componente L é uma peça que faz de interface entre a mesa e a sonda que se encontra representado no ponto 5.4.

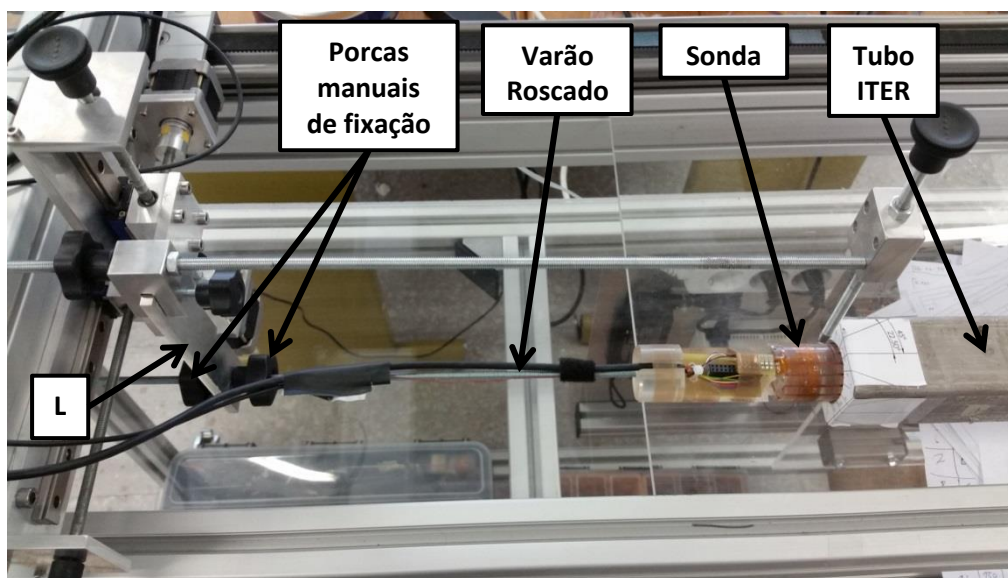


Figura 3.21 – Fixação das sondas à mesa de ensaios.

3.7 – Síntese do Capítulo

Neste capítulo foram expostos os requisitos que as sondas de CI devem satisfazer para a resolução do problema de inspeção. Foram concebidas e descritas sete configurações de sondas e analisadas as condições em que podem ser utilizadas. Foi aferida a sua maior ou menor capacidade de deteção de defeitos com diferentes orientações e os seus modos de funcionamento. Encontra-se também, neste capítulo, a solução construtiva encontrada para a produção das diferentes sondas e a sua aparência final. Por fim, é apresentada a montagem da sonda na mesa onde serão realizados os ensaios.

4 – SIMULAÇÃO NUMÉRICA

4.1 – Introdução

Neste capítulo descrevem-se as simulações numéricas realizadas apenas para as sondas inovadoras de CI descritas no capítulo anterior, permitindo conhecer o comportamento dos fenómenos elétricos e magnéticos envolvidos no funcionamento de cada uma das sondas.

Através das simulações numéricas pretende-se também avaliar e prever os efeitos dos diferentes parâmetros de inspeção e tipos de defeitos permitindo otimizar a geometria e os modos de funcionamento das sondas. Para tal, foi realizada uma matriz de parâmetros para cada configuração de sonda, variando parâmetros como frequência, orientação do defeito e posição do defeito em relação às bobinas de leitura (quando aplicável).

São explicados os modelos usados assim como as hipóteses simplificativas. O resultado de cada uma das simulações é também apresentado neste capítulo.

4.2 – Aspetos comuns às diferentes configurações

As bobinas espirais trapezoidais planas usadas nas seguintes configurações foram baseadas na bobina vAx2x8 descrita na Tabela 3.8. Para as simulações foi necessário criar um modelo de uma bobina espiral trapezoidal. Na sonda fabricada esta bobina é feita em substrato flexível e

é colocada à volta dum cilindro ficando curva. No entanto, tal não é fácil de replicar no *software* de simulação. Foi usada uma hipótese simplificativa que consiste em assumir que a curvatura poderia ser planificada desde que as correntes induzidas fechem pelo perímetro do tubo. Assim, para efeitos de simulação, o tubo passou a ser uma placa e as bobinas passaram a ser espirais trapezoidais planas.

As bobinas espirais trapezoidais têm um *lift-off* de 0,1 mm e os enrolamentos de excitação, presentes nas configurações 3, 4, e 7, de 0,2 mm. O material do tubo usado nas simulações tem as características do tubo do ITER. O defeito simulado tem as dimensões do defeito mais pequeno presente no tubo do ITER: 2 mm de comprimento, 0,5 mm de profundidade e 0,2 mm de espessura.

A simulação de uma inspeção requer tantas simulações quanto o número de pontos solicitados para construir o gráfico da evolução da impedância ao longo da posição. Foram definidos incrementos do movimento da sonda de 0,5 mm e na zona onde o centro da sonda passa pelo defeito de 0,1 mm. O varrimento linear foi realizado dos -8 mm aos 8mm sendo que o zero corresponde à posição em que o centro do defeito e o centro da bobina espiral trapezoidal coincidem. Ou seja, cada simulação de inspeção corresponde a 49 simulações. Por uma questão de conveniência na manipulação do modelo não foi a sonda a deslocar-se sobre o material mas sim o defeito.

Os modelos e os parâmetros de simulação foram realizados com recurso a uma macro, para cada configuração, construída para o efeito no *software* de simulação CST EM Studio Suite [43]. Desta maneira, é possível alterar qualquer parâmetro, quer geométrico, quer numérico, com grande rapidez e comodidade portanto, um modelo parametrizado. No Anexo 1 encontra-se, a título de exemplo, o código elaborado para o conceito 3.

O *software* CST EM STUDIO calcula, no domínio do tempo, uma solução numérica aproximada das equações de Maxwell na sua formulação integral, daí a sua denominação *Finite Integration Technique* (FIT) [44]. O modelo usa elementos hexaédricos para a discretização das geometrias.

4.3 – Excitação axial com leitura em bobina espiral trapezoidal – Configuração 3

4.3.1 – Modelo

Na Figura 4.1a encontra-se a representação do modelo geométrico utilizado para as simulações efetuadas. A excitação foi simulada com um enrolamento de perfil quadrado de 0,5

mm de largura. Os enrolamentos de excitação foram modelados, consecutivamente em direções contrárias, e com 8 espiras. O enrolamento foi excitado com uma corrente elétrica de intensidade de 1 A por espira. Todas as simulações desta configuração possuem duas bobinas sensíveis consecutivas. A placa que simulou a parede do tubo tem como dimensões 50x40x3 mm.

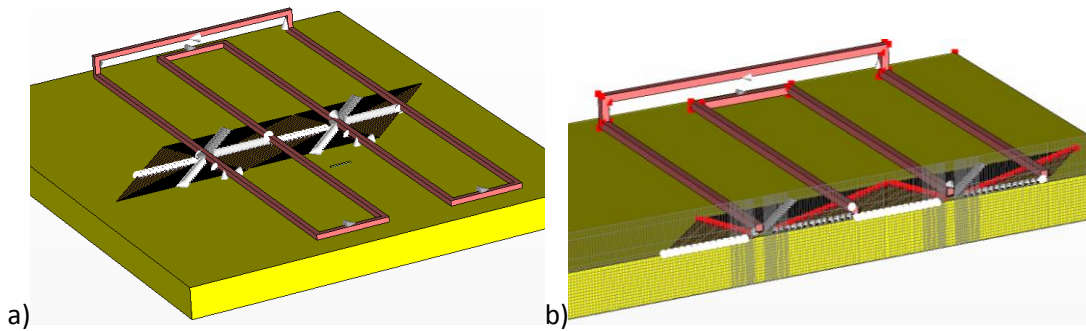


Figura 4.1 – Modelo utilizado para a simulação do conceito 3
a) Vista global do modelo b) Vista em corte da malha.

Para fazer face ao tempo de cálculo foi necessário otimizar a refinação da malha. Foi usado um refinamento da malha com elementos hexaédricos criando uma malha mais refinada no defeito e bobinas resultando em cerca de 1.500.000 elementos (Figura 4.1b).

A construção de bobinas no *software* de simulação requer um circuito fechado para que se possa definir uma corrente a passar pela mesma. Por esta razão, as bobinas espiral trapezoidais não serão uma réplica exata da realidade pois terá que ser fechado o circuito como se ilustra pelo ponto 1 na Figura 4.2. Este troço de ligação pode trazer perturbações nos resultados, especialmente nas simulações que têm uma bobina de excitação em cima, como é o caso. Para manter o *lift-off* da bobina de excitação é necessário a altura desta espira ser baixa o suficiente para tal.

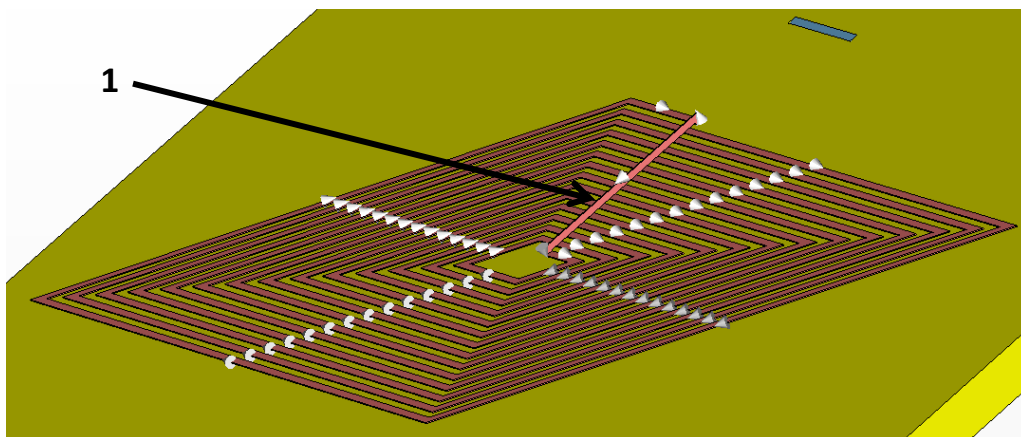


Figura 4.2 – Pormenor das bobinas espiral trapezoidais.

Na Figura 4.3 estão representadas as diferentes orientações dos defeitos usadas na simulação assim como as direções de varrimento. O defeito encontra-se preenchido a vermelho para facilitar a sua localização. A seta a preto indica a direção do varrimento.

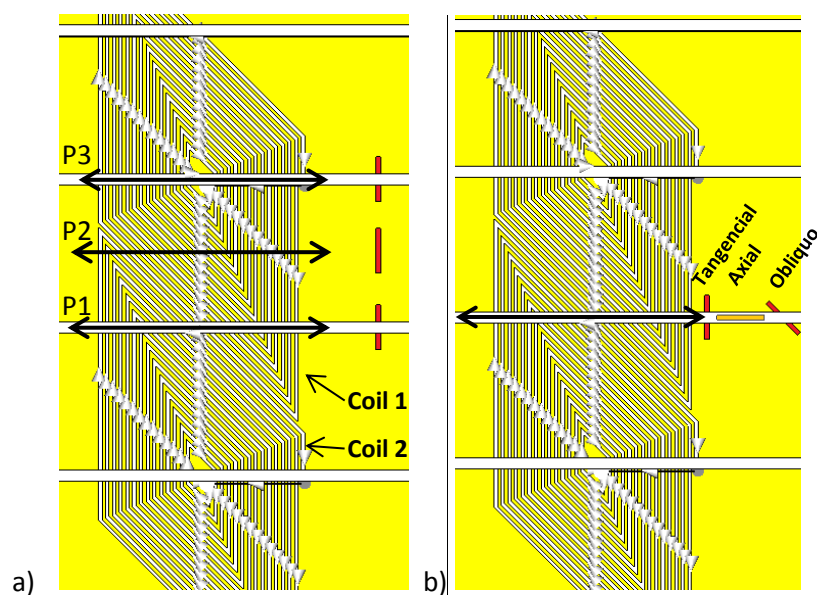


Figura 4.3 – Posições e orientações de simulação do defeito
a) Posições dos defeitos; b) Orientações do defeito.

4.3.2 – Estratégia de Simulação

Na Tabela 4.1 apresenta-se a estratégia de simulação utilizada. Foram utilizadas três frequências diferentes. Fixando uma frequência intermédia, foi variada a posição do defeito e, posteriormente, a orientação do mesmo. Esta estratégia foi seguida igualmente nos capítulos 4.3, 4.4 e 4.5.

Tabela 4.1 – Estratégia de simulação do conceito 3.

Simulação	Parâmetro de inspeção f			Posição do varrimento			Orientação dos defeitos		
	250 kHz	500 kHz	1 MHz	1	2	3	Tangencial	Axial	45°
1		x		x			x		
2	x			x			x		
3			x	x			x		
4		x			x		x		
5		x				x	x		
6		x		x				x	
7		x		x					x

4.3.3 – Resultado da Simulação

Na Figura 4.4 encontra-se representada a densidade das correntes induzidas na superfície do tubo no plano transversal aos enrolamentos de excitação e na Figura 4.5 no plano das bobinas sensíveis. Pode verificar-se que as correntes induzidas em cada troço consecutivo apresentam direções contrárias, tal como foi previsto. De notar que, entre dois troços consecutivos existe uma zona praticamente sem correntes induzidas que impossibilita a deteção de defeitos presentes nessa zona.

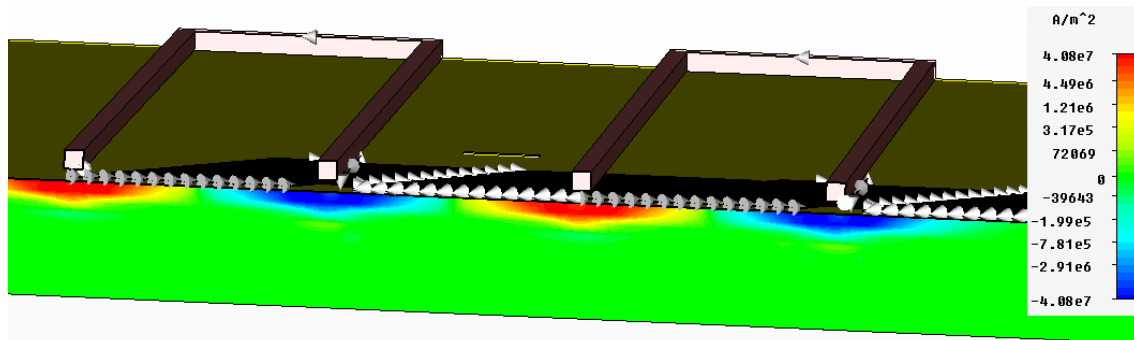


Figura 4.4 – Representação da densidade de correntes induzidas com defeito tangencial na posição 2.

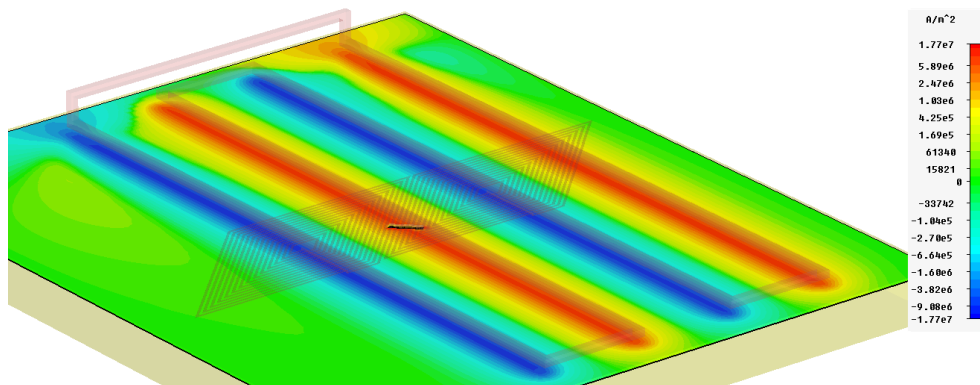


Figura 4.5 – Representação da densidade de correntes induzidas com defeito oblíquo na posição 1.

Na Figura 4.6 encontram-se representadas as orientações das correntes induzidas em torno do defeito. As bobinas sensíveis espirais trapezoidais planas detetam principalmente perturbações causadas pelo defeito no plano das bobinas sensíveis representadas em na Figura 4.6b. As correntes que contornam o defeito por baixo (ver Figura 4.6a) já não são facilmente detetáveis daí a dificuldade acrescida da deteção de defeitos com profundidade reduzida.

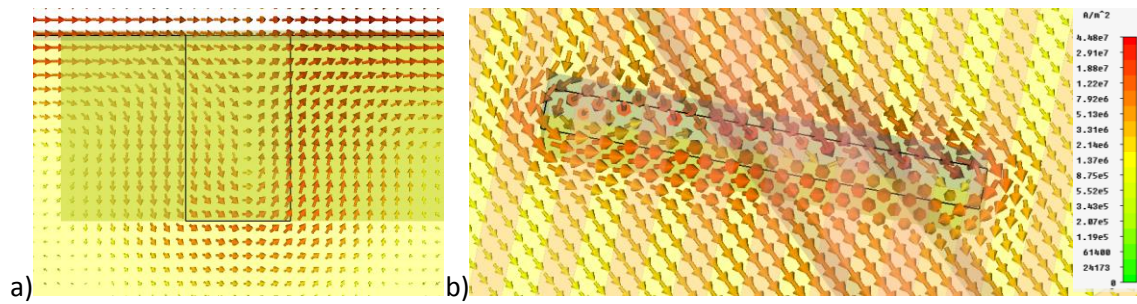


Figura 4.6 – Representação da densidade de correntes induzidas no defeito; a) Vista de perfil do defeito; b) Vista de cima do defeito.

Na Figura 4.7, Figura 4.8 e Figura 4.9 encontram-se os resultados das simulações quando o defeito está na posição 1 (ver Figura 4.3), a frequências diferentes. Este resultado diz respeito à variação de impedância, parte real (Re) e imaginária (Im), de ambas as bobinas espiral trapezoidais sensíveis ao longo de um varrimento linear de 16 mm com o defeito a meio. Estando o defeito entre ambas as bobinas sensíveis, a sua resposta será simétrica e de sinal contrário, como se pode confirmar pelos gráficos das figuras.

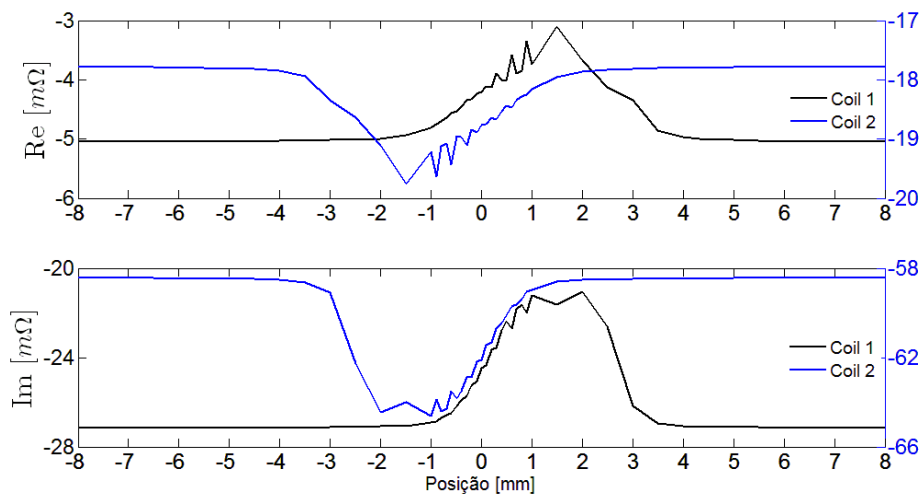


Figura 4.7 – Simulação a 500 kHz com defeito tangencial na posição 1.

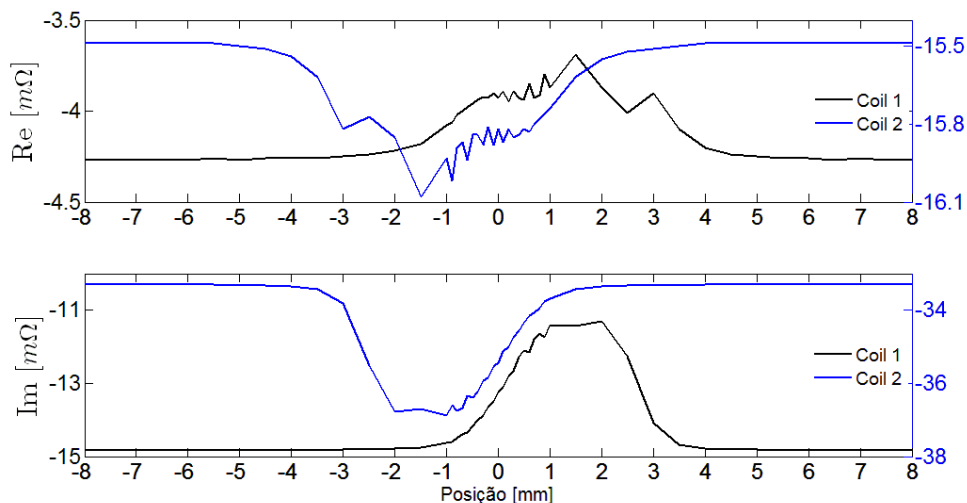


Figura 4.8 – Simulação a 250 kHz com defeito tangencial na posição 1.

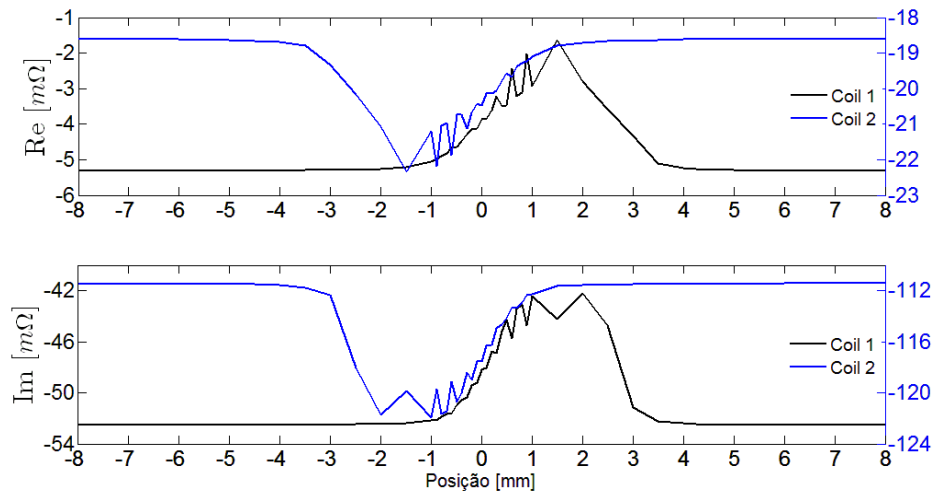


Figura 4.9 – Simulação a 1 MHz com defeito tangencial na posição 1.

Na Figura 4.10 ilustra-se a incapacidade de detecção do defeito quando este se encontra na posição 2. Nesta zona não existem correntes induzidas devido à distância existente entre o defeito e os dois troços consecutivos da bobina de excitação.

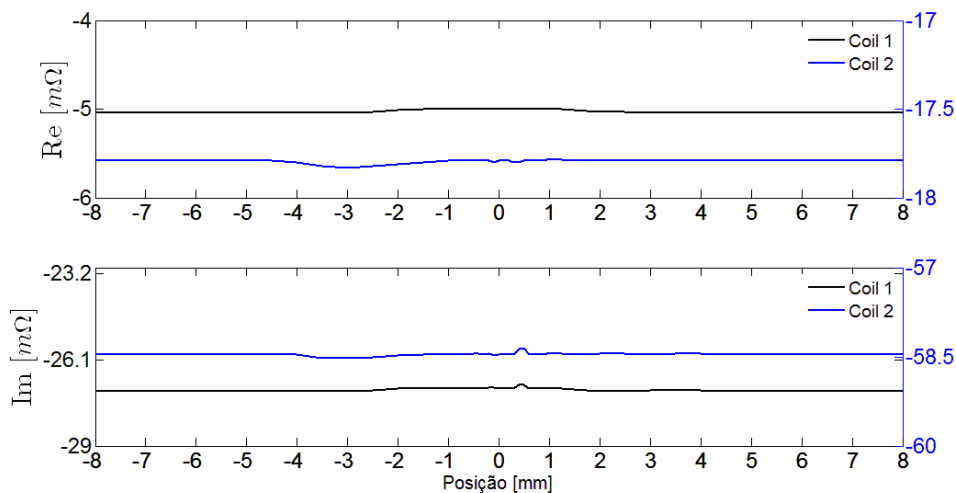


Figura 4.10 – Simulação a 500 kHz com defeito tangencial na posição 2.

Na Figura 4.11 encontra-se o resultado da simulação quando o defeito passa pelo centro da bobina espiral trapezoidal. A resposta deveria ser apenas uma senoide, no entanto, é possível visualizar uma bossa na zona dos 2 aos 5 mm que se deve provavelmente ao pormenor explicado anteriormente (Figura 4.2). É apenas uma consequência do modelo e não corresponde à realidade física uma vez que este pormenor não existe nas sondas produzidas.

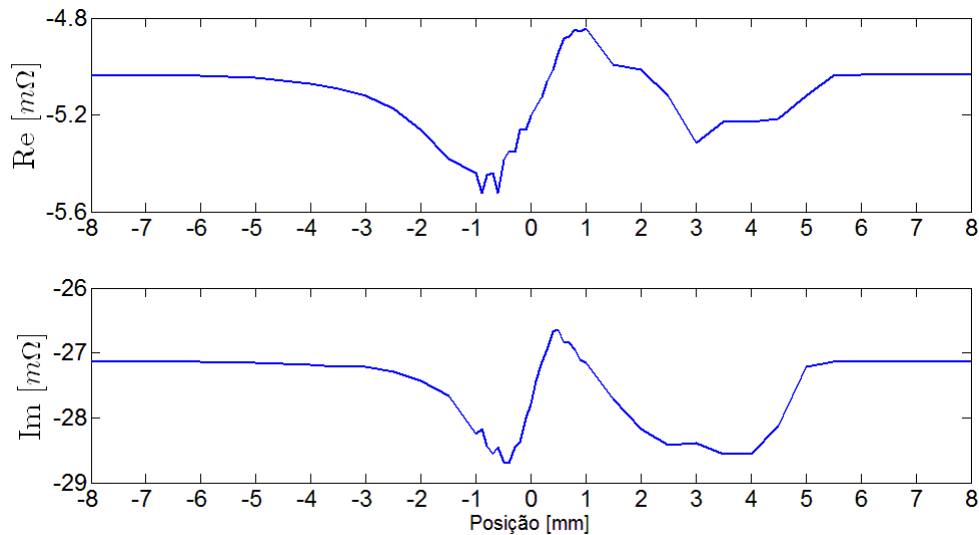


Figura 4.11 – Simulação a 500 kHz com defeito tangencial na posição 3.

Na Figura 4.12 apresenta-se a comparação dos resultados obtidos entre o defeito orientado axialmente e o defeito orientado tangencialmente. O defeito tangencial provoca um sinal com amplitude superior ao do defeito axial, tal como era de esperar. O ponto forte desta sonda é a capacidade de deteção de defeitos tangenciais pois gera correntes induzidas axialmente, ou seja, perpendiculares ao defeito sendo desta maneira maior a facilidade da deteção de uma perturbação das mesmas.

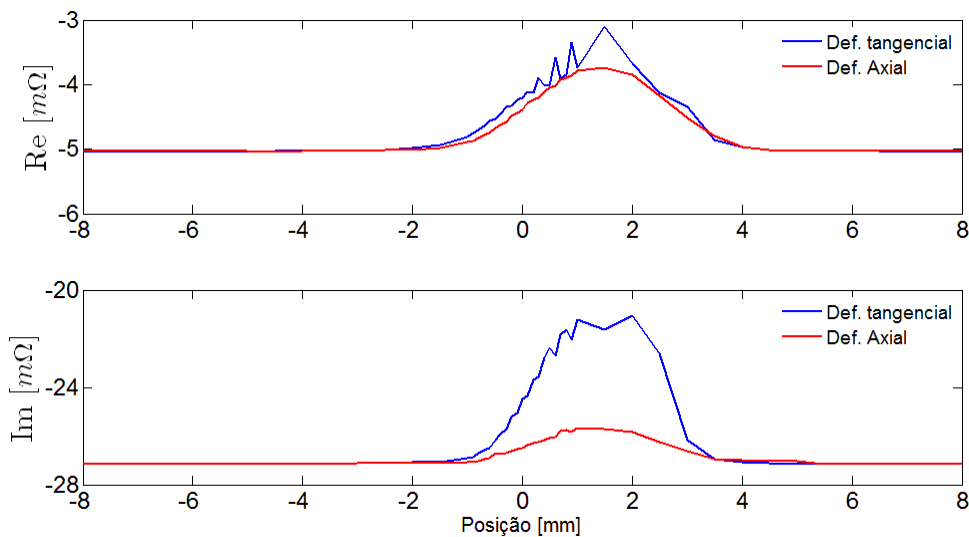


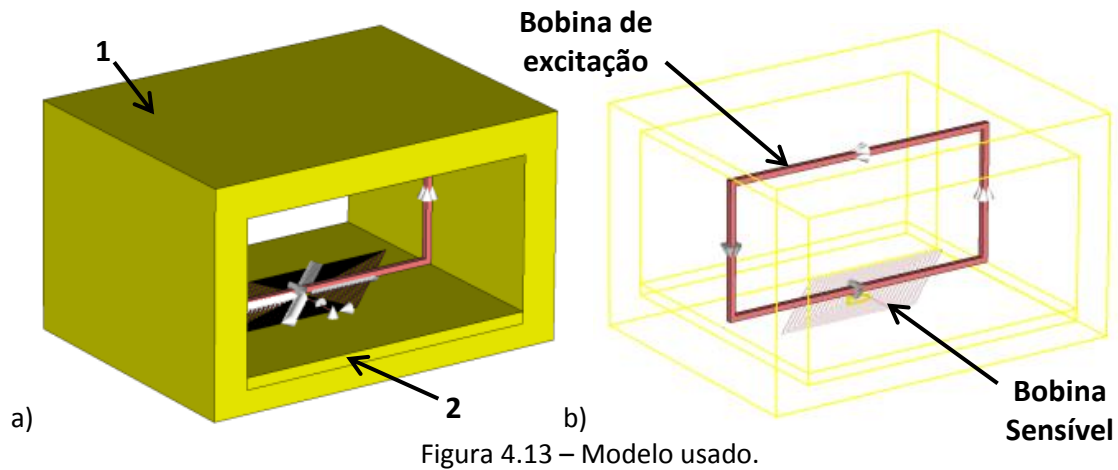
Figura 4.12 – Simulação a 500 kHz na posição 1 com diferentes orientações de defeito.

4.4 – Excitação tangencial e leitura em bobina espiral trapezoidal – Configuração 4

4.4.1 – Modelo

Na Figura 4.13 encontra-se a representação do modelo geométrico utilizado para as simulações efetuadas. Nesta configuração existe um pormenor importante que consiste no facto de as correntes induzidas circularem/fecharem pelo perímetro do tubo. Para tal, foi

necessário criar um modelo que simulasse esse comportamento, o qual é assinalado na Figura 4.13 pelo número 1. Esta estrutura 1 provocou um aumento do domínio de cálculo. Com o objetivo de não aumentar demasiado o tempo de simulação foi criado um componente 2 no mesmo material e características, mas com uma malha mais refinada.



A bobina de excitação consiste num perfil quadrado de 0,5 mm de lado. O enrolamento tangencial tem 15 espiras e foi excitado com uma corrente elétrica com intensidade de 1 A por espira. As simulações desta configuração usaram apenas uma bobina sensível para diminuir o domínio de cálculo, aumentando assim a velocidade da simulação. Foi usado um refinamento da malha com elementos hexaédricos criando uma malha mais refinada, no defeito e bobinas, resultando em cerca de 1.300.000 elementos de malha (Figura 4.14).

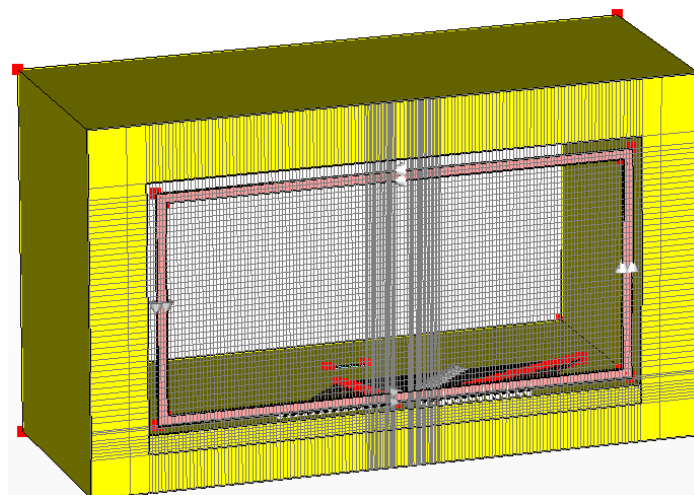


Figura 4.14 – Vista em corte da malha.

4.4.2 – Resultado da Simulação

Na Figura 4.15 está representada a densidade de correntes induzidas na superfície do tubo. As correntes induzidas apresentam direções contrárias em cima e em baixo comprovando assim que as correntes induzidas fecham pelo perímetro do tubo. Desta maneira, em cada fração da superfície do tubo existem apenas correntes induzidas num sentido. Antes de criar o componente 1 da Figura 4.13 foram realizadas simulações e foi constatado que o modelo não cumpria esta especificidade obtendo resultados diferentes.

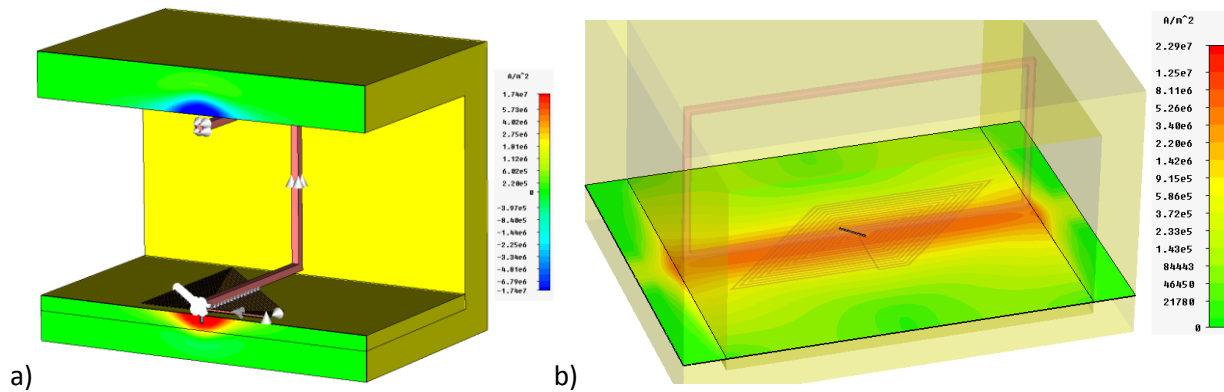


Figura 4.15 – Representação da densidade de correntes induzidas na superfície interior do tubo; a) Em corte; b) No plano das bobinas sensíveis

Na Figura 4.16 encontram-se representadas as orientações das correntes induzidas em torno do defeito. Na Figura 4.16a é possível visualizar as perturbações nas correntes induzidas causadas pela presença do defeito

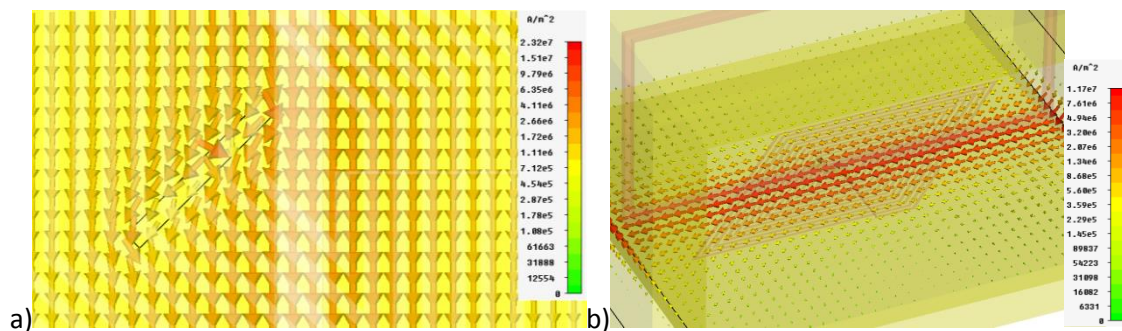


Figura 4.16 – Representação da densidade de correntes induzidas; a) Vista de cima do defeito; b) Vista de isométrica;

Na Figura 4.17, Figura 4.18 e Figura 4.19 apresenta-se os resultados das simulações quando o defeito está na posição 1 (ver Figura 4.20b), a diferentes frequências. O defeito encontra-se bem representado, no plano imaginário, nas diferentes frequências. Apesar da leitura ser feita aos terminais da mesma bobina, o sinal corresponde a um sinal característico das sondas diferenciais, isto é devido à configuração geométrica da sonda, nomeadamente devido à fato de a excitação ser realizada por um filamento exterior (reflexão) e de as CI serem perturbadas,

pela presença dos defeitos, de forma simétrica e em relação ao centro das bobinas sensíveis. Isto provoca uma troca de sinal da tensão induzida e consequentemente um sinal em forma de sinal diferencial.

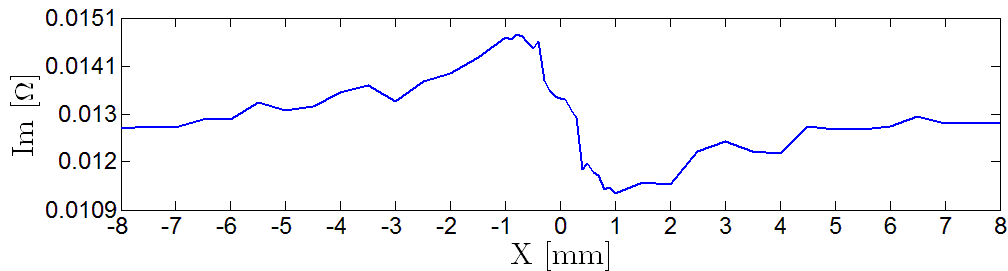


Figura 4.17 – Simulação a 250 kHz com defeito tangencial na Posição 1.

O pico máximo do sinal corresponde a quando o centro da bobina se encontra a aproximadamente meio milímetro do defeito o que pode indicar uma largura de bobina sensível grande demais. Confirmando-se pela Figura 4.18 da direita em que o defeito ao começar a ser varrido pela bobina não produz praticamente variação no sinal de variação de impedância lido. O aumento da frequência permite uma amplitude maior do sinal mas não necessariamente uma melhor definição.

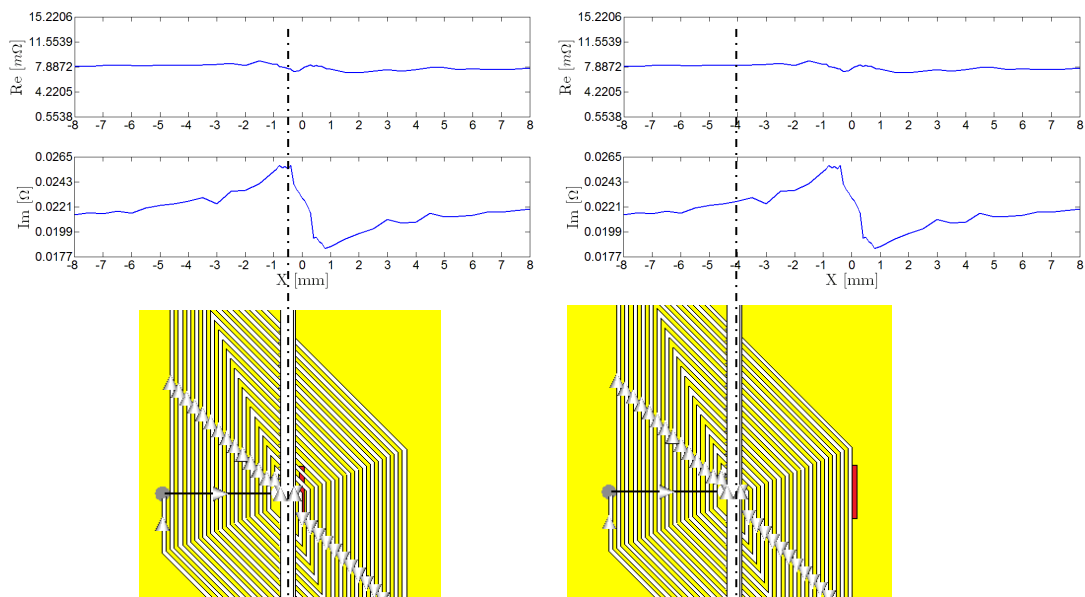


Figura 4.18 – Simulação a 500 kHz com defeito tangencial na Posição 1.

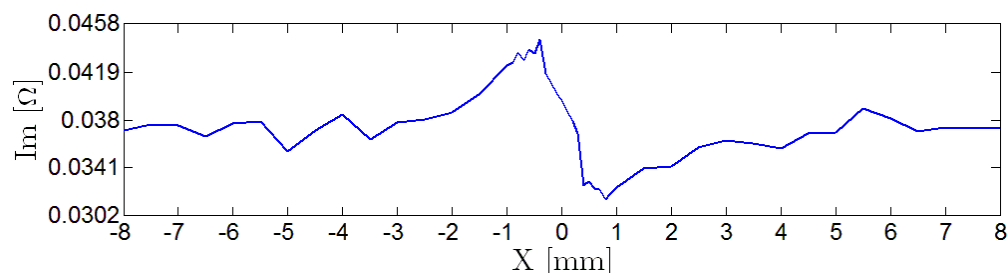


Figura 4.19 – Simulação a 1 MHz com defeito tangencial na Posição 1.

Na Figura 4.20 encontram-se os resultados das simulações usando diferentes posições de varrimento. Na posição 1, o defeito passa pelo centro da bobina sensível e a resposta produzida é uma senoide. Na posição 2, o defeito já só intercepta uma parte da bobina sensível (Figura 4.20b), logo a resposta é apenas uma depressão. Na posição 3, o defeito passa apenas numa ponta da bobina sensível, numa zona já demasiado afastada da excitação, não sendo portanto possível a deteção como é possível visualizar.

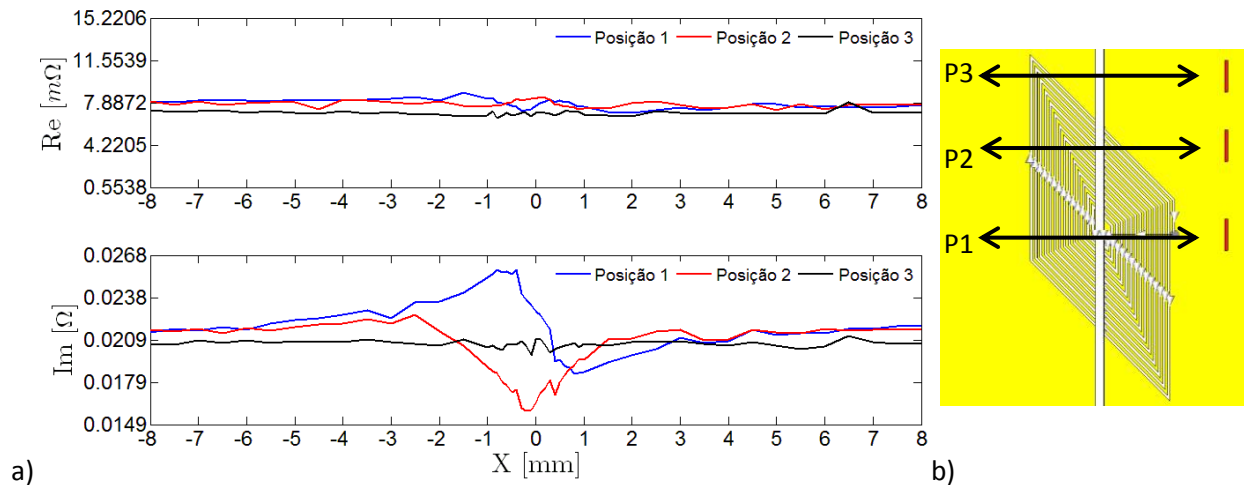


Figura 4.20 – a) Simulação a 500 kHz com defeito tangencial em b) diferentes posições.

Na Figura 4.21 também é possível visualizar os resultados das simulações com as diferentes orientações de defeitos passando pela posição 1. Conforme esperado, o defeito axial provoca um sinal com a maior amplitude e o defeito tangencial com a menor. Esta configuração de sonda é ideal para a deteção de defeitos axiais devido à sua excitação tangencial. No entanto, é possível notar que a deteção de defeitos tangenciais, destas dimensões, também é possível.

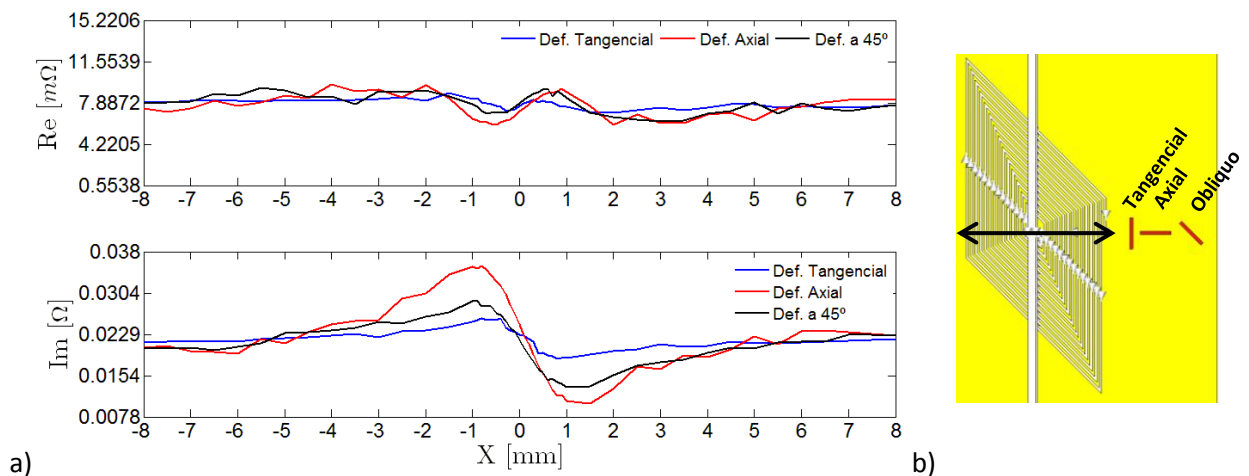


Figura 4.21 – a) Simulação a 500 kHz na posição 1 com diferentes orientações de defeito; b) Orientações.

4.5 – Excitação e leitura em bobina espiral trapezoidal – Configuração 5

4.5.1 – Modelo

Na Figura 4.22a encontra-se a representação do modelo geométrico utilizado para as simulações efetuadas.

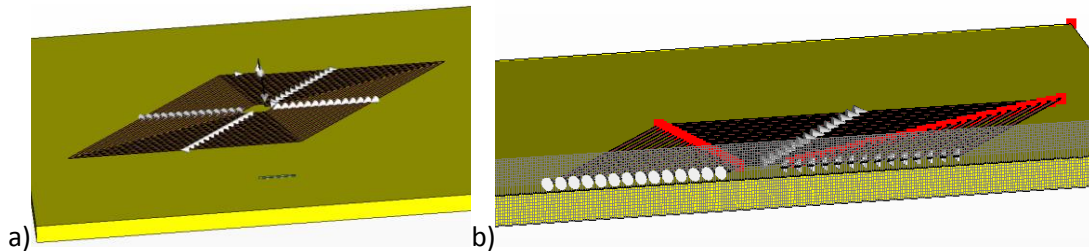


Figura 4.22 – Modelo usado para o conceito 5.

A excitação e a leitura são ambas realizadas pela bobina espiral trapezoidal. Todas as simulações, desta configuração, usaram apenas uma bobina sensível para diminuir o domínio de cálculo, aumentando assim a velocidade da simulação.

Foi usado um refinamento da malha com elementos hexaédricos criando uma malha mais refinada no defeito e bobinas resultando em cerca de 2.200.000 elementos de malha (Figura 4.22b).

4.5.2 – Resultado da Simulação

Na Figura 4.23 está representada a densidade de correntes induzidas na superfície do tubo. As correntes induzidas apresentam direções contrárias no eixo X uma vez que a bobina é circular.

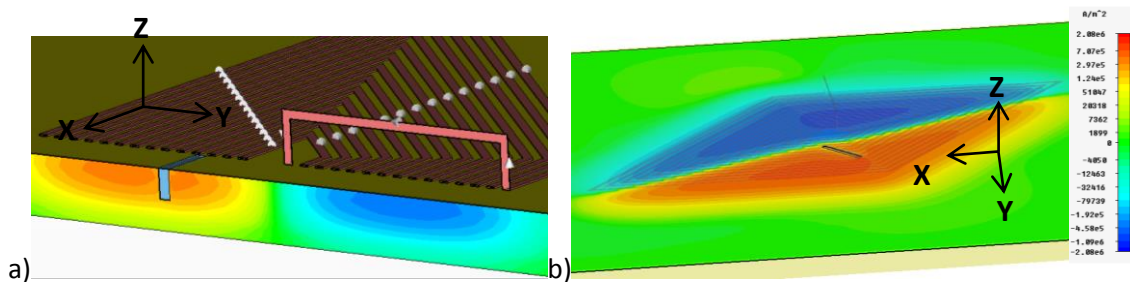


Figura 4.23 – Representação da densidade de correntes induzidas na superfície interior do tubo.

Na Figura 4.24a é possível visualizar as perturbações causadas pelo defeito nas correntes induzidas. As correntes induzidas geradas na superfície do tubo apresentam a orientação da bobina espiral trapezoidal como ilustrado na Figura 4.24b.

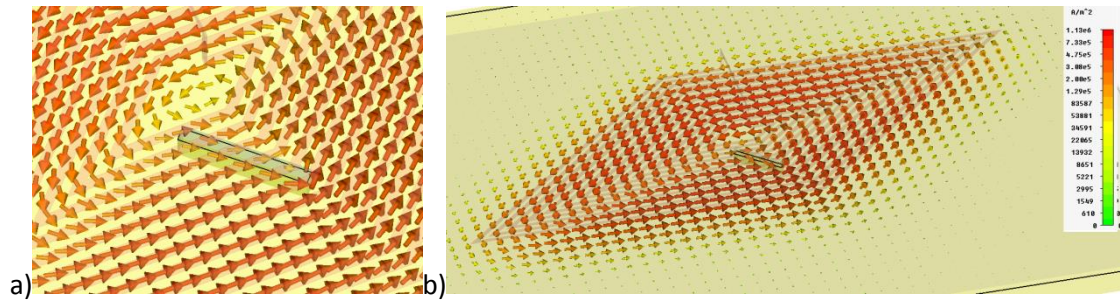


Figura 4.24 – Representação da orientação das CI na superfície interior do tubo; a) Vista de pormenor na zona do defeito; b) Orientação das CI geradas pela bobina.

Na Figura 4.25 e Figura 4.26 encontra-se os resultados das simulações quando o defeito está na posição 1 (ver Figura 4.27b), a frequências diferentes. O defeito encontra-se representado por dois topos aproximadamente simétricos.

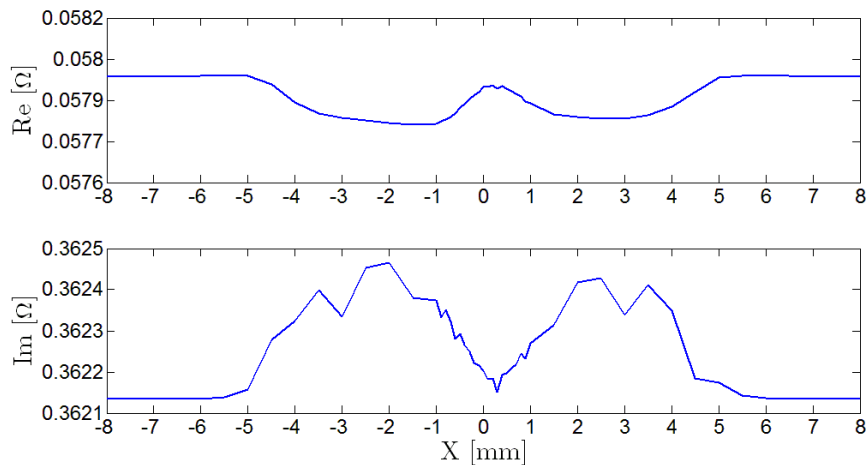


Figura 4.25 – Simulação a 250 kHz com defeito tangencial na posição 1.

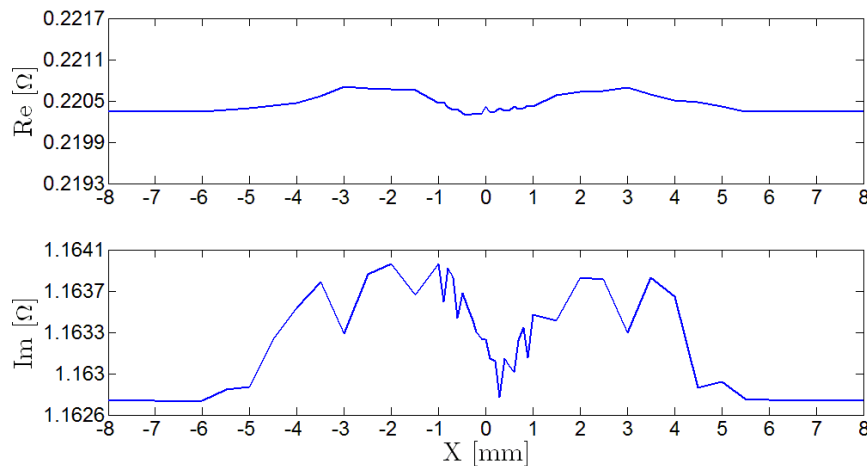


Figura 4.26 – Simulação a 1 MHz com defeito tangencial na posição 1.

Na Figura 4.27 encontram-se os resultados das simulações usando o defeito tangencial passando pelas diferentes posições. Na posição 1, o defeito passa pelo centro da bobina e a resposta produzida é constituída por duas lombas. Na posição 2, o defeito já só apanha uma parte da bobina (Figura 4.27b), logo a resposta é apenas uma lomba ligeiramente desviada do

centro. Na posição 3, o defeito passa apenas numa ponta da bobina, não sendo possível a detecção como é possível visualizar.

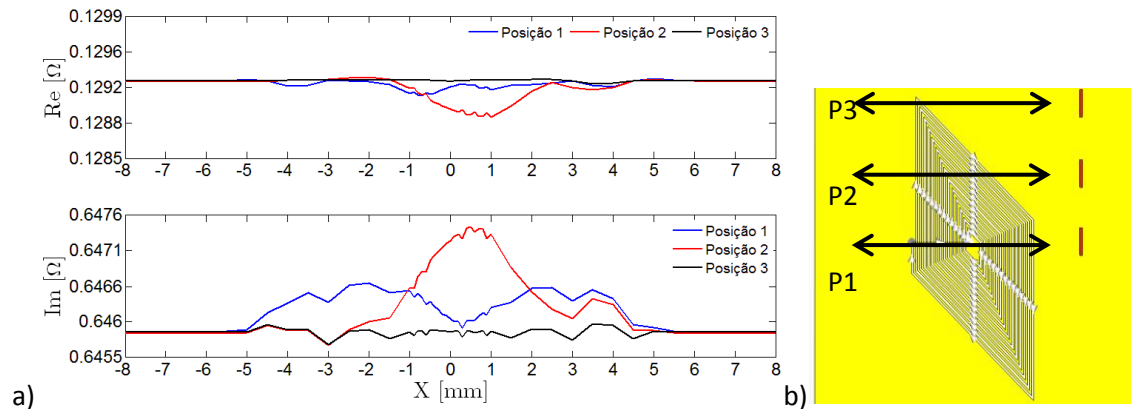


Figura 4.27 – a) Simulação a 500 kHz com defeito tangencial em b) diferentes posições.

Na Figura 4.28 é possível visualizar os resultados das simulações com as diferentes orientações de defeitos que passam pela posição 1. O defeito axial provocou um sinal com a maior amplitude e o tangencial com a menor. Tal pode ser explicado porque, na zona da bobina que o defeito passa nesta posição, os enrolamentos tem a mesma direção que o defeito tangencial.

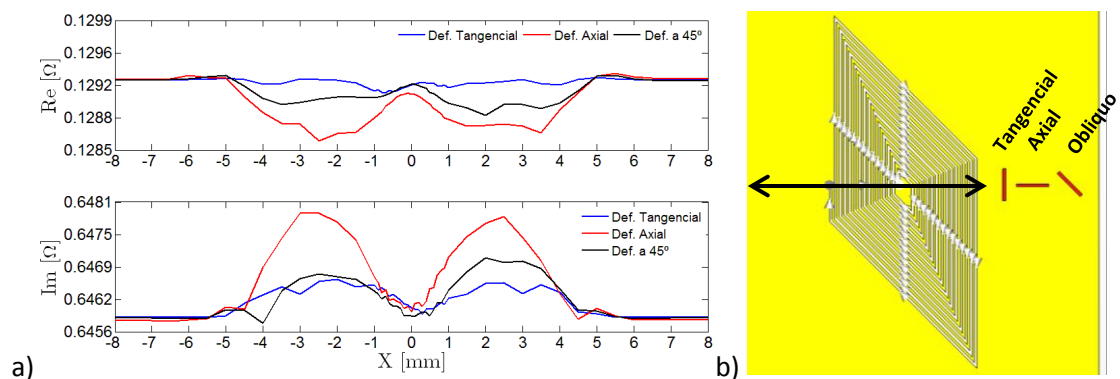


Figura 4.28 – a) Simulação a 500 kHz na posição 1 com b) diferentes orientações de defeito.

4.6 – Excitação helicoidal com leitura em bobina espiral trapezoidal – Configuração 7

4.6.1 – Modelo

Na Figura 4.29a encontra-se a representação do modelo geométrico utilizado para as simulações efetuadas. A excitação foi realizada com um perfil quadrado de 0,5 mm de largura. Tal como na sonda produzida para esta configuração, os enrolamentos têm 15 espiras. Para a simulação da bobina de excitação optou-se por deita-la sobre o tubo, permitindo assim o fecho das correntes. Esta solução poderia ter sido utilizada também na simulação do conceito 4, uma vez que o modelo usado simulava também a geometria dessa configuração. Para esta

simulação foi preciso mudar a orientação da trajetória do defeito. Este modelo, menos volumoso, permitiu usar duas bobinas sensíveis.

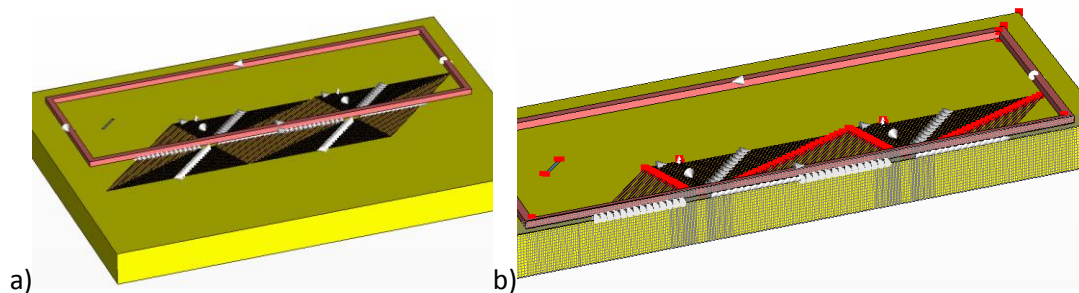


Figura 4.29 – Modelo utilizado para a simulação do conceito 7
a) Vista global do modelo b) Vista em corte da malha.

Na Figura 4.30 estão representadas as diferentes orientações dos defeitos usadas na simulação assim como as posições de varrimento. O defeito encontra-se preenchido a vermelho para facilitar a sua localização. A seta a preto indica a direção do varrimento. Foi usado um refinamento da malha com elementos hexaédricos criando uma malha mais refinada no defeito e bobinas, resultando em cerca de 2.200.000 elementos de malha (Figura 4.29b).

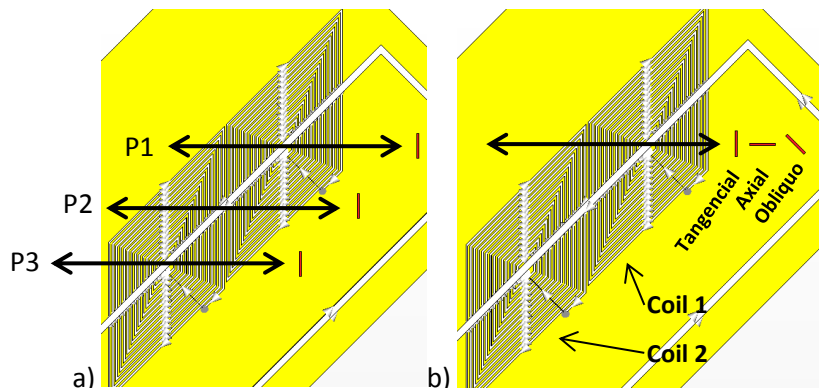


Figura 4.30 – Posições e orientações de simulação do defeito
a) Posições dos defeitos; b) Orientações do defeito.

4.6.1.1 – Resultado da Simulação

Na Figura 4.31a está representada a densidade de correntes induzidas na superfície do tubo em absoluto. Na Figura 4.31b apresenta-se a componente Y da densidade de correntes induzidas, as quais exibem direções contrárias comprovando assim que as correntes induzidas fecham na superfície do tubo. Desta maneira, é garantido que na fração usada para a simulação, onde está a bobina sensível, existem apenas correntes induzidas num sentido, o que está de acordo com a realidade física no interior do tubo, no qual as CI circulam sempre no mesmo sentido em todo o perímetro.

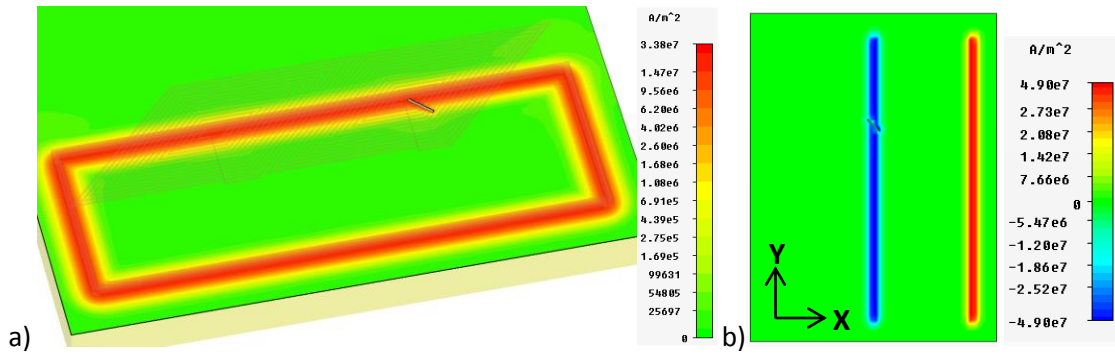


Figura 4.31 – Representação da densidade de correntes induzidas na superfície interior do tubo; a) Vista isométrica b) Vista de cima.

A orientação das correntes induzidas é mais uma vez evidenciada na Figura 4.32b. Na Figura 4.32a é possível visualizar as perturbações nas CI causadas pelo defeito.

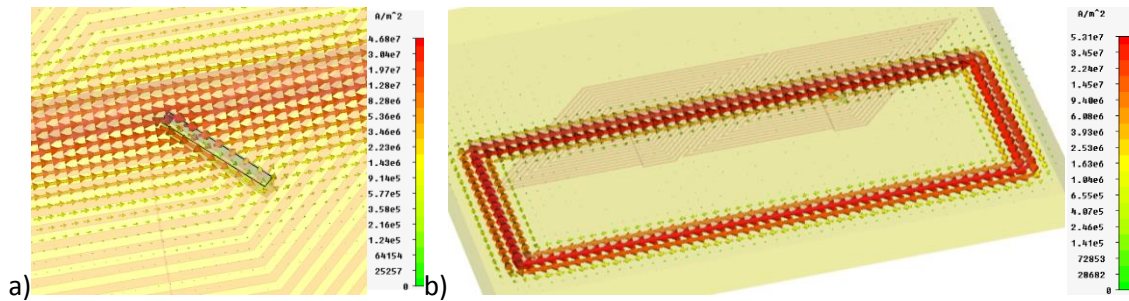


Figura 4.32 – Representação da orientação das correntes induzidas na superfície interior do tubo.

Na Figura 4.33 e Figura 4.34 encontram-se os resultados das simulações quando o defeito está na posição 1, a frequências diferentes. O defeito encontra-se bem representado, no plano imaginário, nas diferentes frequências. A bobina adjacente, por sua vez, não o deteta uma vez que o defeito apenas passa debaixo de uma ponta da bobina sensível e já muito longe da bobina de excitação.

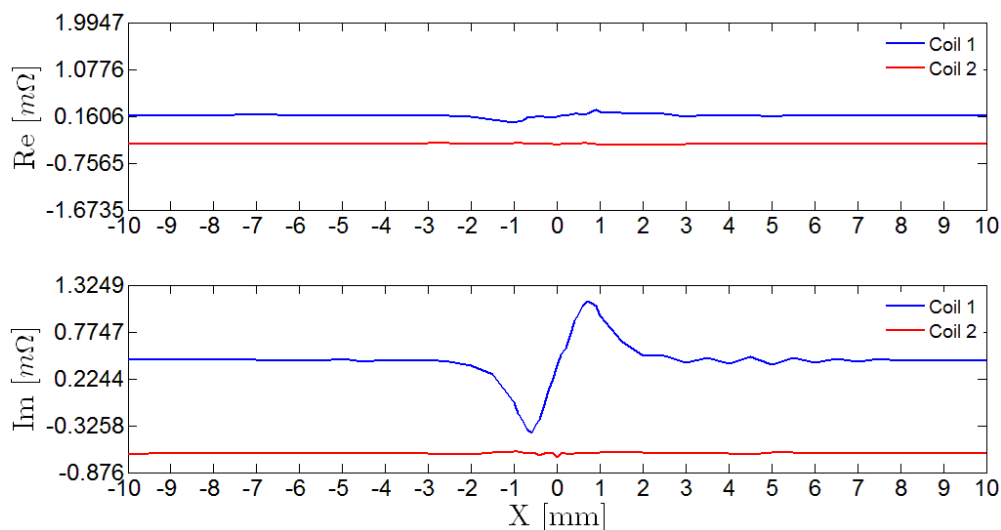


Figura 4.33 – Simulação a 250 kHz com defeito tangencial na posição 1.

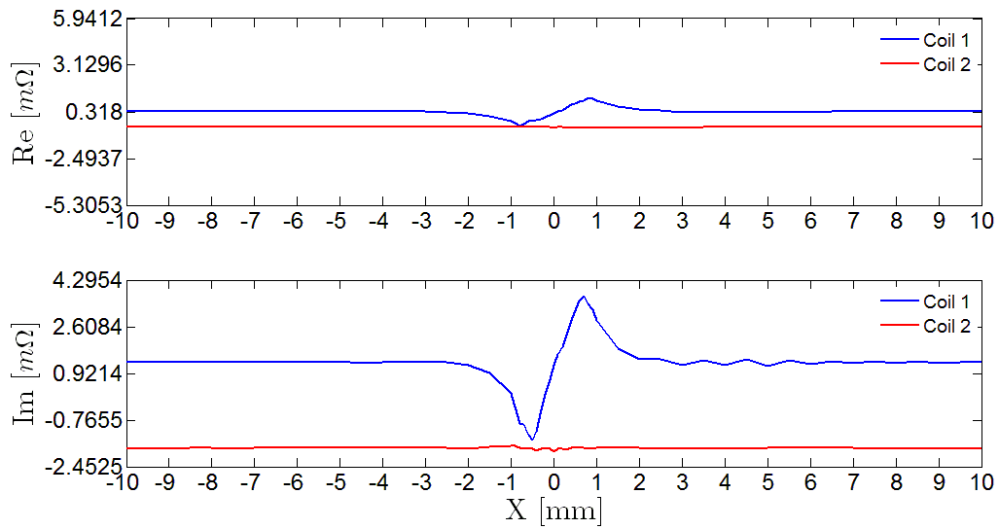


Figura 4.34 – Simulação a 1 MHz com defeito tangencial na posição 1.

Na Figura 4.35 encontra-se o resultado da simulação quando o defeito está na posição 2, ilustrando-se a variação de impedância de ambas as bobinas espiral trapezoidais sensíveis, quando passam pelo defeito. Estando o defeito entre ambas as bobinas sensíveis, a sua resposta será simétrica e de sinal contrário, como se pode confirmar pelo gráfico da figura.

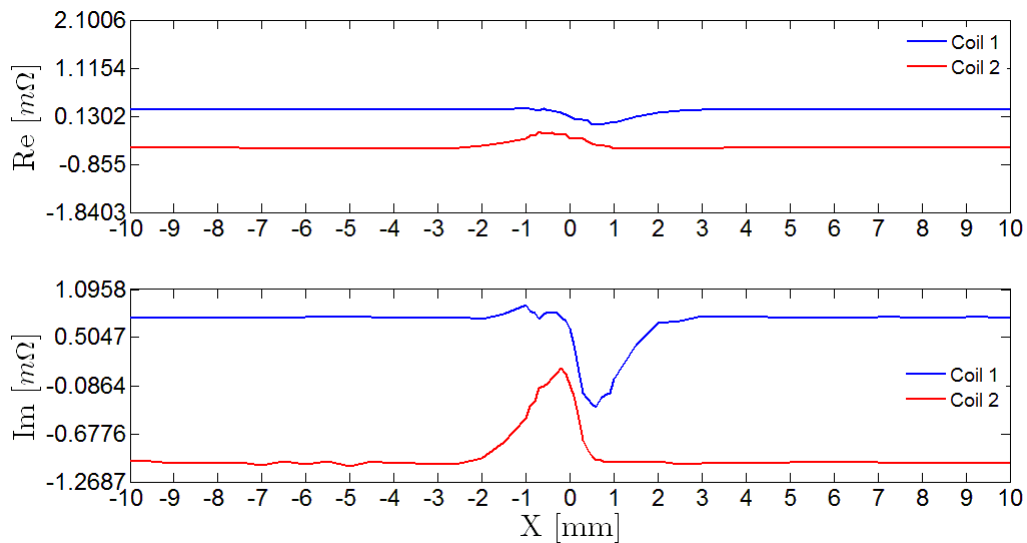


Figura 4.35 – Simulação a 500 kHz com defeito tangencial na posição 2.

Na Figura 4.36 encontra-se o resultado da simulação quando o defeito está na posição 3. Este resultado também é semelhante aos resultados da posição 1 uma vez que nesta posição o defeito passa pelo centro da segunda bobina. Nota-se que a segunda bobina detetou o defeito ao contrário da primeira.

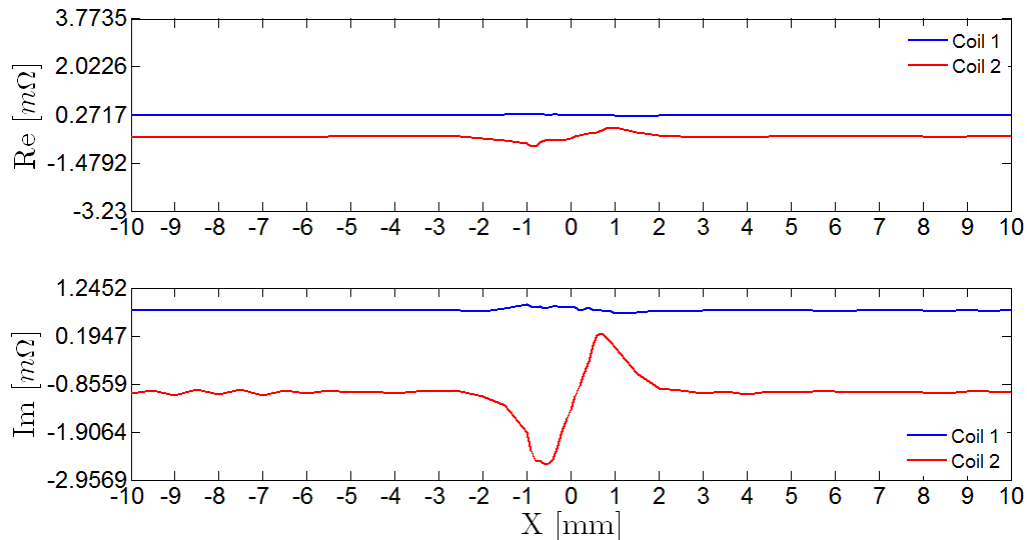


Figura 4.36 – Simulação a 500 kHz com defeito tangencial na posição 3.

Na Figura 4.37 é possível visualizar os resultados das simulações com as diferentes orientações de defeitos passando pela posição 1. O defeito oblíquo provocou um sinal com a maior amplitude e o tangencial com a menor. Tal pode ser explicado pelo fato de, na zona da bobina em que o defeito passa nesta posição, os enrolamentos têm a mesma direção que o defeito tangencial (ver Figura 4.30d). O defeito oblíquo, por sua vez, perto do centro da bobina, tem uma orientação transversal aos enrolamentos da bobina sensível.

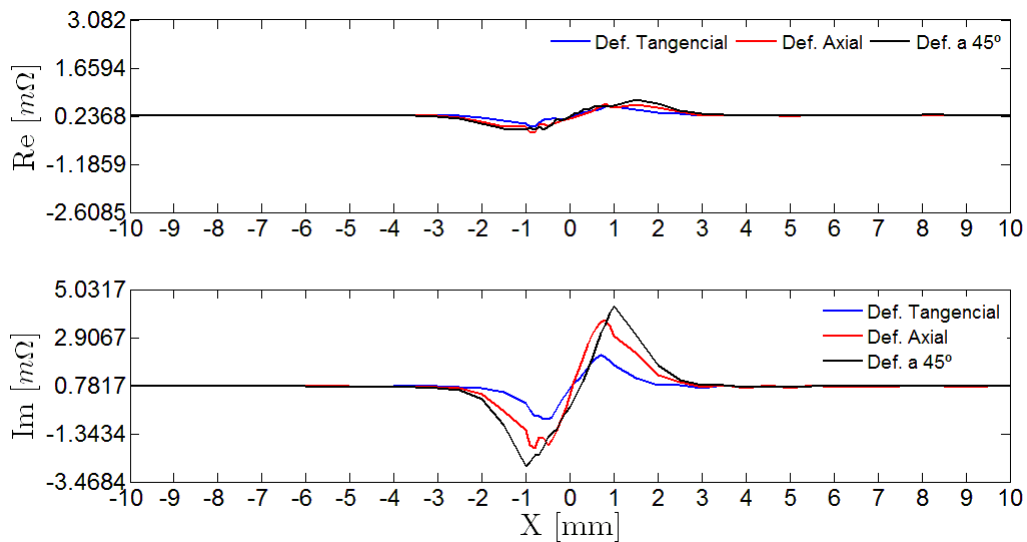


Figura 4.37 – Simulação a 500 kHz na posição 1 com diferentes orientações de defeito.

4.7 – Síntese do Capítulo

Neste capítulo descreve-se o resultado das simulações numéricas de algumas das configurações de sonda concebidas. Todas as simulações foram realizadas com o defeito menor, #3, presente no tubo do ITER. O material do tubo usado nas simulações tem as características do tubo do ITER.

Devido à necessidade de conhecer os valores de impedância em várias posições da bobina face ao defeito, foi necessário realizar múltiplas simulações para cada parâmetro de cada configuração. No total realizaram-se cerca de 1400 simulações, o que corresponde a 49 por gráfico apresentado. Este pormenor condicionou a fluidez dos resultados obtidos.

O defeito foi detetado em todas as configurações. Embora em algumas posições a bobina sensível não detete qualquer variação na impedância, existem sempre bobinas adjacentes que estão em posições mais favoráveis permitindo assim a sua deteção. O aumento da frequência permitiu uma amplitude do sinal superior nos resultados obtidos.

5 – DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO PARA INSPEÇÃO

5.1 – Introdução

Neste capítulo encontra-se descrito o trabalho desenvolvido com o objetivo de criar os meios laboratoriais para a realização dos ensaios de CI.

Foi desenvolvido um equipamento que possibilita a locomoção das sondas no interior dos componentes a inspecionar com um elevado grau de exatidão. Este equipamento consiste numa mesa xyz móvel e com capacidade de suportar e armazenar o material e equipamento necessários à realização dos ensaios. Este capítulo apresenta a concepção, projeto e construção da mesa de ensaios, assim como, os seus requisitos funcionais, a mecânica envolvida e respetivo controlo e instrumentação.

5.2 – Requisitos Funcionais

A inspeção de perfis de geometria tubular com CI implica fazer a aquisição do sinal da sonda (impedância elétrica) ao longo do tubo, sendo necessário garantir um avanço controlado da sonda nessa direção. Na Tabela 5.1 encontram-se os requisitos que o equipamento deve cumprir.

Tabela 5.1 – Requisitos funcionais do equipamento para inspeção.

Requisito funcional	Comentário
Automatização do processo de inspeção	O equipamento deve ser acionado e movimentado por computador, de forma a garantir a reprodutibilidade dos ensaios.
Fixação expedita e eficaz das sondas de CI	A fixação deve impedir movimento, tanto axial como tangencial, da sonda em relação aos componentes móveis do equipamento.
Capacidade de ajuste da posição de sonda em yz	A sonda deverá ser fixa ao componente móvel e a sua posição deve ser ajustável, vertical e horizontalmente. Este ajustamento deve ser realizado com recuso a motores controlados por computador. Este ajuste permitirá afinar a posição e concentricidade da sonda de CI com o diâmetro interior do tubo.
<i>Software</i> com uma <i>graphical user interface</i> intuitiva e funcional.	Deve ser possível através do <i>software</i> controlar todos os parâmetros de funcionamento dos equipamentos.
Ligação dos terminais das sondas de CI rápida e expedita	A ligação dos terminais das sondas de CI ao equipamento de aquisição de sinal deve ser rápida e expedita permitindo a troca de sonda de CI rápida assim como a alteração do seu modo de funcionamento.
Garantir a mobilidade do equipamento	O equipamento deve ser móvel e integrar o controlo e instrumentação necessários à realização das inspeções. Deverá ter espaço para o armazenamento das sondas fabricadas, para os componentes a inspecionar e uma prateleira para o computador de modo a ter num só equipamento, todos os componentes necessários ao ensaio.
Custo reduzido	O protótipo funcional deve ser modular e utilizar componentes standardizados com a finalidade de simplificar a sua produção e proporcionar uma solução económica.

5.3 – Conceção, Projeto e Produção do Equipamento

5.3.1 – Construção Mecânica

A solução concebida consiste numa mesa constituída por perfis tipo Bosch [45] 40x40 mm acoplados através de esquadros próprios (Figura 5.1). Nas extremidades do chassis da mesa foram instaladas rodas possibilitando desta forma a mobilidade requerida. As rodas permitem uma rotação de 360° na direção vertical (Y) e possuem travões permitindo assim a imobilização da mesa.

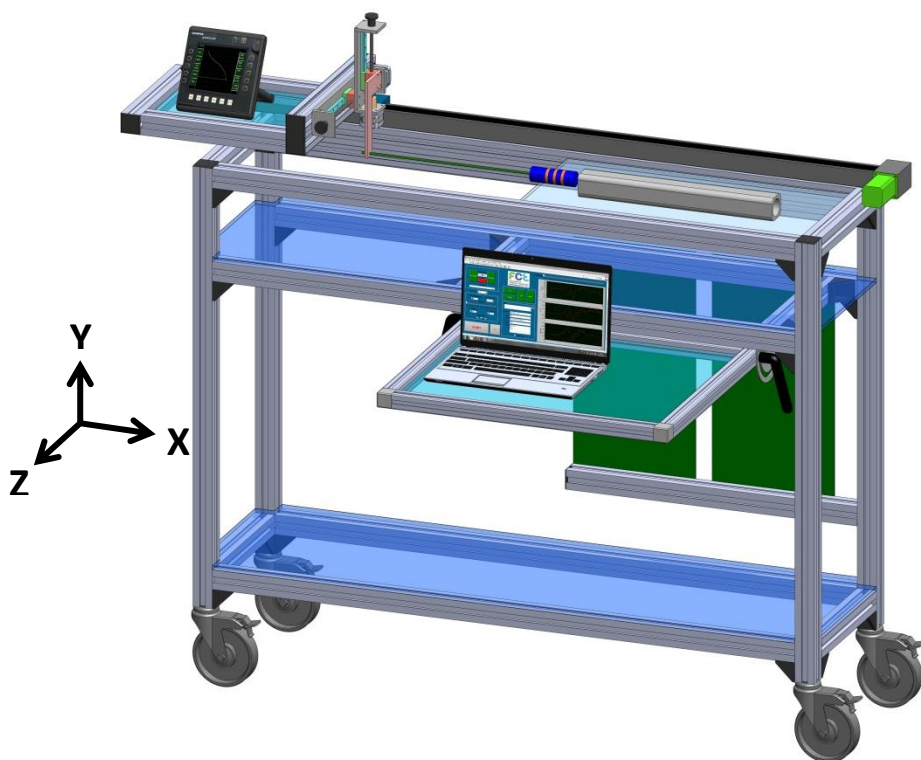


Figura 5.1 – Modelação do equipamento em *Solidworks*.

O movimento da sonda na direção do tubo (eixo x) é efetuado por uma guia linear de correia Igus [46]. A correia é acionada por um motor passo a passo (MY23HS1-5 da ASTROSYN) que é controlado pelo computador através do *software Labview*.

Um perfil 40x80 mm foi acoplado à guia linear onde foi montada uma estrutura para o posicionamento da sonda na direção vertical e horizontal ilustrada na Figura 5.2.

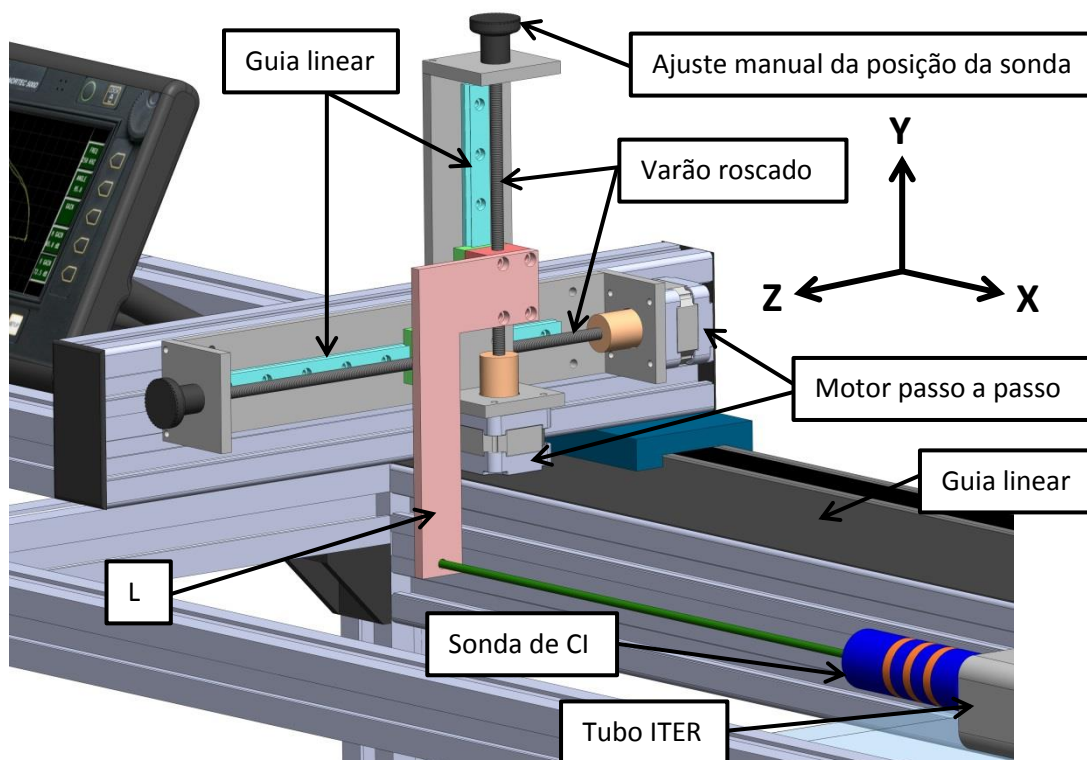


Figura 5.2 – Estrutura para o ajustamento da posição da sonda em *Solidworks*.

A estrutura concebida para o ajustamento da sonda pode ser dividida em duas semelhantes, uma para cada direção, cujo modelo está representado na Figura 5.3. Cada subestrutura é constituída por um motor passo a passo que aciona a rotação de um varão roscado M6 por onde passa um componente com um furo roscado fixo a um rolamento linear, representado a vermelho na figura. A rotação do varão gera um movimento linear a esse componente. A subestrutura horizontal irá proporcionar o movimento deste componente ao longo do eixo Z com um curso de 10 cm. A este componente foi acoplado a subestrutura vertical que irá produzir o movimento ao longo do eixo Y com um curso de 20 cm.

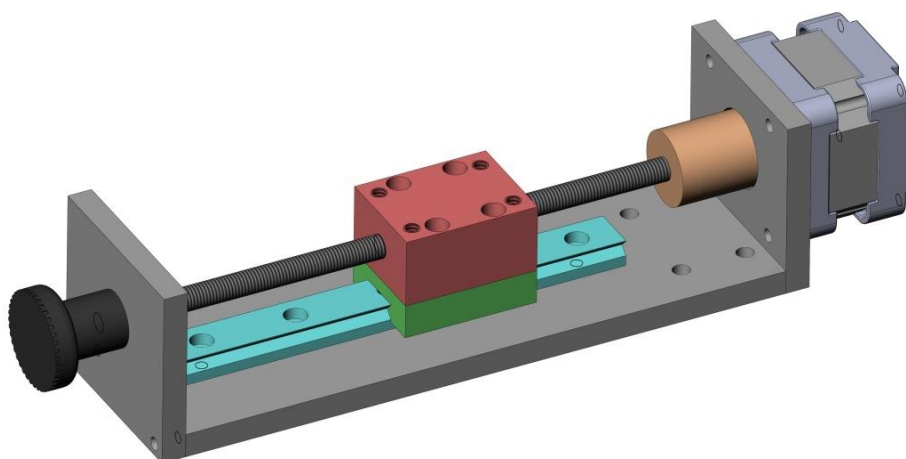


Figura 5.3 – Subestrutura para o ajustamento da posição da sonda modelada em *Solidworks*.

Ao componente vermelho da subestrutura vertical foi fixado um L que por sua vez transmitirá o movimento combinado ao varão da sonda. O ajuste vertical e horizontal também é possível de efetuar, sem recurso aos motores, através de porcas manuais na extremidade, do veio, oposta à do motor. Este ajuste é extremamente importante porque permite afinar a posição e concentricidade da sonda de CI com o diâmetro interior do tubo.

Nos perfis horizontais superiores corre uma prateleira de PMMA onde se colocará o componente a inspecionar. Uma prateleira de acrílico, colocada 18 cm abaixo, permite armazenar as sondas e outra prateleira idêntica, colocada na parte inferior da mesa, tem como propósito armazenar os componentes a inspecionar.

No perfil onde está apoiada a prateleira de cima foi instalada uma prateleira que tem a possibilidade fazer um movimento de 90° (ver Figura 5.4). Esta prateleira pode ser fixa na horizontal ou com uma pequena inclinação para suportar o computador durante um ensaio. Em qualquer outra situação que não seja de ensaio pode ser fixa na posição vertical ocupando assim menos espaço.

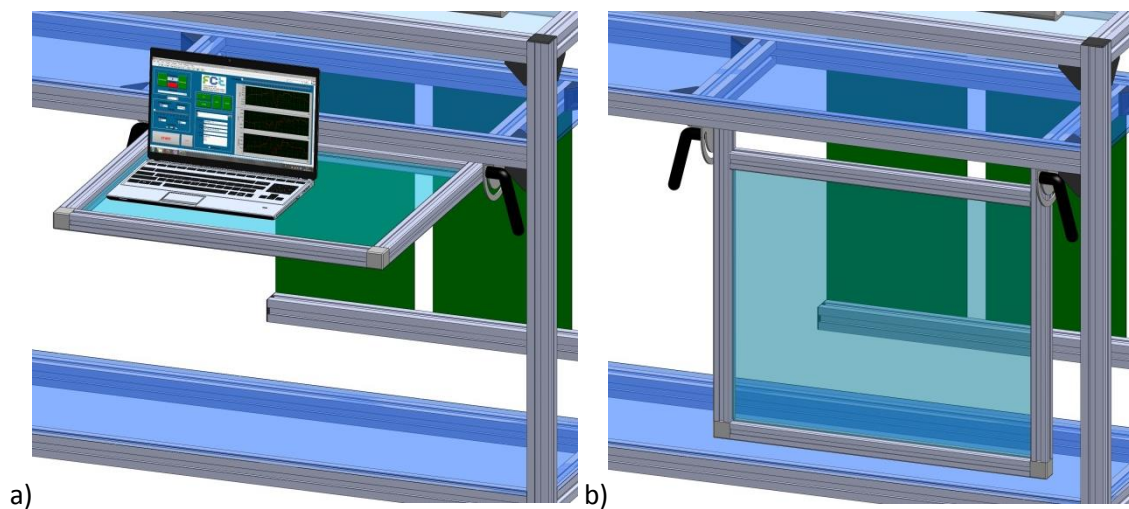


Figura 5.4 – Pormenor da prateleira para o computador modelada em *Solidworks*.

a) Prateleira na horizontal com computador; b) Prateleira na vertical.

Na lateral oposta à prateleira do computador serão colocados, em chapas metálicas, os componentes de controlo e a instrumentação necessária à realização dos ensaios (ilustradas a verde na Figura 5.4), nomeadamente os *drivers* e alimentação dos motores. Este equipamento dispõe de uma placa de acrílico para proteção de eventuais acidentes.

5.3.2 – Controlo e Instrumentação

A movimentação da sonda é realizada através de uma correia acionada por um motor passo a passo (MY23HS1-5 da ASTROSYN) cuja potência elétrica é fornecida por uma placa ASTROSYN P808A que, por sua vez, está ligada ao computador por meio de uma placa NI USB-6008 da National Instruments.

5.3.3 – Software

Para a realização do controlo dos ensaios, quer seja de locomoção, quer seja de aquisição de dados foi adaptado um programa do *software* Labview. Foi utilizada a linguagem de programação do ambiente LabVIEW 2012 da *National Instruments*, devido à sua elevada capacidade na aquisição, processamento e análise de dados em tempo real e também à facilidade de criação de uma *Graphical User Interface* (GUI).

Os dados adquiridos pelo equipamento OLYMPUS foram transferidos através de um sistema de aquisição de dados multifuncional (DAQ-6008) para o *software* LabVIEW que recolheu, analisou, apresentou e armazenou os dados das avaliações experimentais. Na Figura 5.5 apresenta-se a interface gráfica do utilizador (GUI) do *software*, onde são controlados os parâmetros de deslocamento da sonda, mostrados os resultados de cada ensaio e guardados para tratamento posterior. É também possível o controlo dos dois motores que fazem o ajuste de posição da sonda em Y e Z.

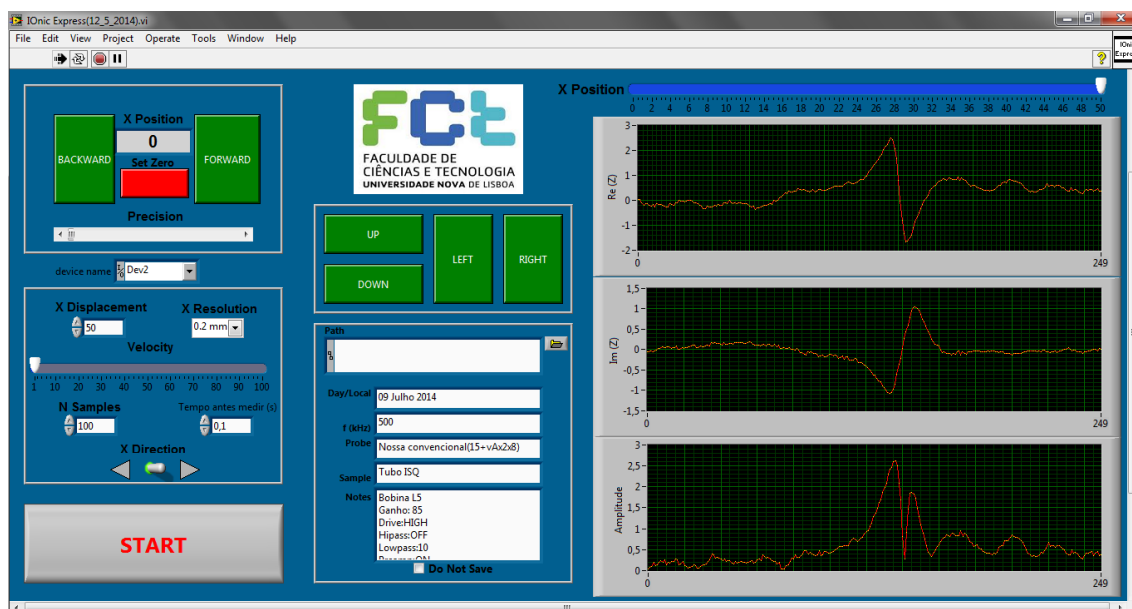


Figura 5.5 – Interface gráfica do utilizador do *software* LabVIEW.

5.4 – Detalhe Final da Mesa de Ensaios

Na Figura 5.6a apresenta-se o aspeto final da mesa de ensaios. A construção do protótipo realizou-se no laboratório de ensaios não destrutivos do NTI do DEMI da FCT-UNL. Foram desenvolvidos diversos componentes, projetados especificamente para o protótipo, como é o caso da maior parte dos componentes presentes na Figura 5.6b.

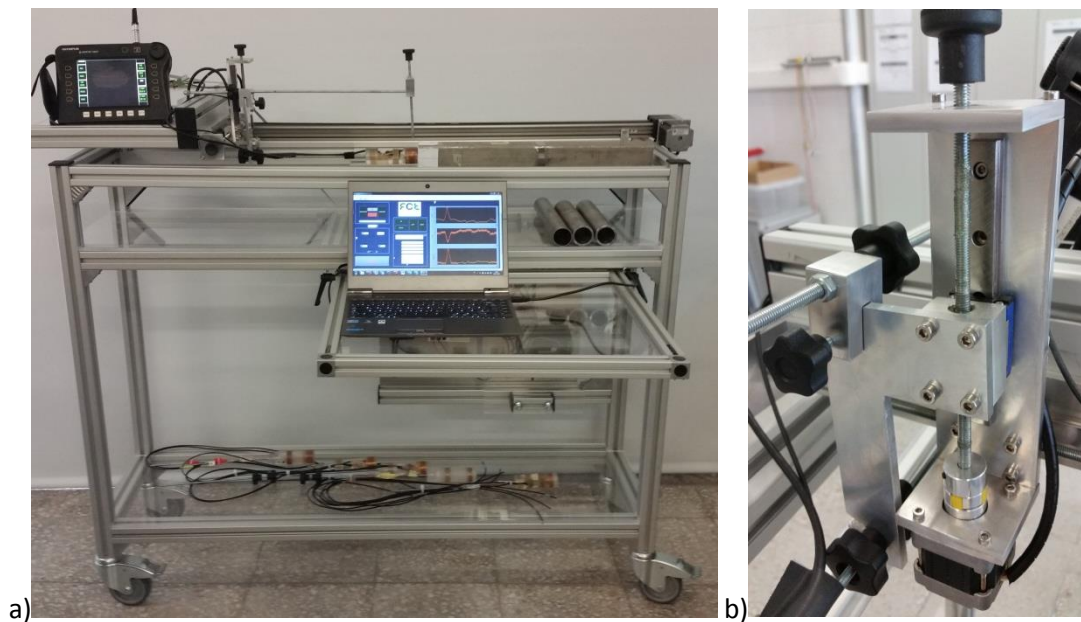


Figura 5.6 – a) Resultado final da construção da mesa de ensaios;
b) Sistema de ajuste de posição vertical da sonda

Para a realização dos ensaios é necessária a mudança frequente de sondas e respetivas ligações. Para facilitar este processo, foi concebido um elemento ilustrado na Figura 5.7a que permite a fácil e rápida fixação dos cabos das sondas permitindo também alterar o modo de funcionamento das sondas de acordo com o que foi descrito em §2.4.



Figura 5.7 – a) Ligação da sonda ao cabo LEMO b) Componentes sem movimento relativo entre eles.

A esse elemento está ligado, na outra extremidade, um cabo com ligação LEMO que por sua vez é conectado ao Nortec. Sendo a leitura da sonda extremamente sensível, qualquer movimento dos fios provoca um ruído indesejável. Para minimizar este efeito foi construída uma base no perfil móvel para suportar o Nortec como se representa na Figura 5.7b. Desta maneira não existe movimento relativo entre todos estes componentes (sonda, cabos de ligação da sonda ao Nortec e o equipamento Nortec). A saída do sinal do Nortec para a DAQ 6008 já é feita por sinal analógico, pelo que não está sujeita a este fenómeno.

No L que suporta a sonda, fixou-se também um componente regulável (indicador de posição), constituído por dois varões roscados, que permite indicar, durante a realização da inspeção, a posição da bobina sensível da sonda no eixo X. Esta indicação é útil pois, a localização exata da sonda no tubo, face aos defeitos, é desconhecida. Com este componente é sempre conhecida a localização da bobina sensível no interior do tubo.

Na Figura 5.8 pode ser visualizada a eletrónica e instrumentação utilizada. Ligando a extensão presente na chapa metálica à corrente elétrica a mesa dispõe de energia para a realização dos ensaios.

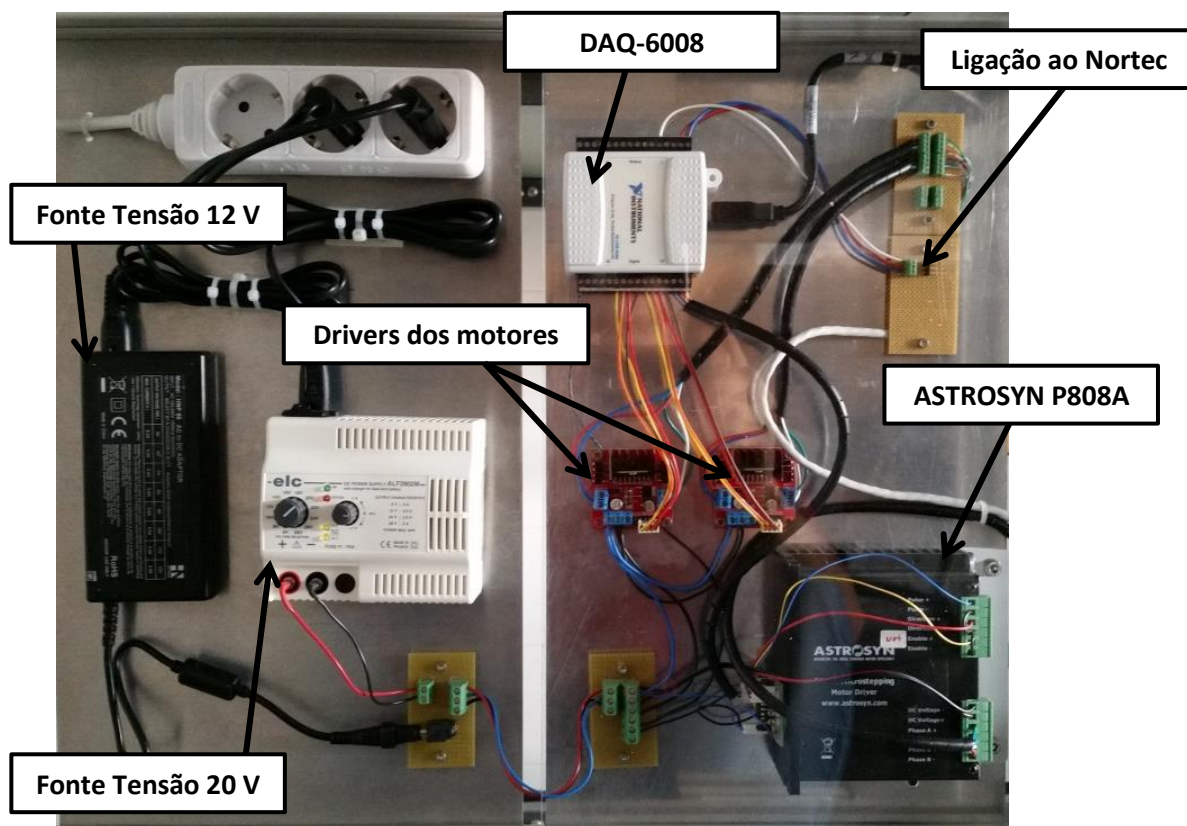


Figura 5.8 – Componentes de controlo e instrumentação.

Fica disponível uma entrada para a alimentação do computador e as restantes fornecem energia a duas fontes de tensão, uma com 12 V e outra com 20 V. A fonte de tensão de 12 V alimenta os *drivers* dos motores passo a passo do posicionamento vertical e horizontal da sonda (Y e Z). O motor passo a passo que efetua o avanço da sonda através do acionamento da correia da guia linear, necessita de uma placa ASTROSYN P808A para o seu controlo o qual é alimentado com uma tensão de 20 V. Todos os drivers estão ligados aos canais digitais da placa DAQ-6008 que serve de interface com o computador. Nos canais analógicos da DAQ-6008 é adquirido o sinal produzido pelo Nortec.

Os componentes colocados no suporte do lado direito são cobertos por uma placa de acrílico, do tamanho da chapa, para proteção dos componentes. Esta placa tem liberdade de movimento horizontal, permitindo fácil acesso aos componentes.

Na Figura 5.9 é possível visualizar a mesa com a prateleira do computador rebaixada. Este movimento permite a diminuição de volume da mesa quando não está a ser utilizada ocupando assim menos espaço.

Na Figura 5.9 encontram-se as cotas de atravancamento com e sem a prateleira do computador levantada. A mesa de inspeção com as prateleiras vazias e sem o Nortec e computador tem uma massa de cerca de 52 kg.

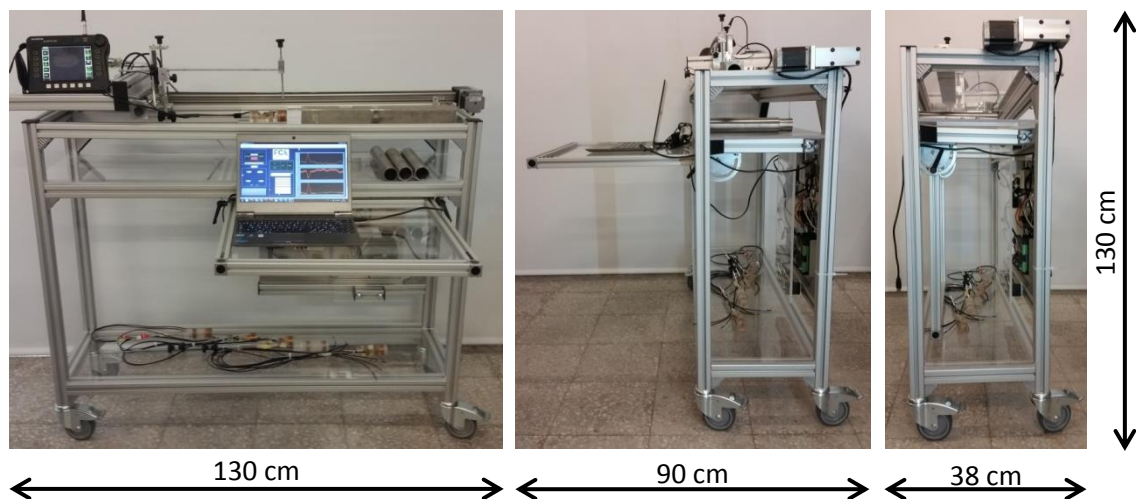


Figura 5.9 – Cotas de atravancamento.

Na Tabela 5.2 uma estimativa dos custos de produção deste equipamento.

Tabela 5.2 – Estimativa dos custos de produção do equipamento.

	Componentes	Custo
Componentes Estruturais	Rolamentos lineares	60 €
	Guias 120 cm	56 €
	Maquinagem	200 €
	Acrílico	300 €
	Perfil Bosch	164 €
	Rodas	50 €
	Chapas alumínio	20 €
	Esquadros	69 €
	Tampas	4 €
	Guia IGUS	446 €
Componentes Elétricos	Astrosyn P808A	165 €
	DAQ NI	300 €
	PCB	10 €
	Drivers motores pequenos	10 €
	Fonte 20V	80 €
	Transformador 12 V	60 €
	Motores passo a passo pequenos	80 €
	Motor MY23HS1-5	42 €
	Extensão elétrica	5 €
	Total	2.121 €

5.5 – Síntese do Capítulo

Neste capítulo descreveu-se a conceção e desenvolvimento das condições laboratoriais para os END por CI, nomeadamente uma mesa de inspeção para a realização dos ensaios das várias configurações de sonda de CI criadas.

Foi desenvolvido um equipamento que possibilita a locomoção das sondas no interior dos componentes a inspecionar, com um elevado grau de exatidão. A mesa é móvel, e tem capacidade para suportar e armazenar o material e equipamento necessário à realização dos ensaios.

Foi abordada a conceção, projeto e construção da mesa assim como, os seus requisitos funcionais, nomeadamente a mecânica envolvida e respetivo controlo e instrumentação.

A mesa de ensaios constitui uma mais-valia e pode ser aproveitada futuramente na realização de ensaios e demonstrou grande versatilidade e utilidade.

6 – VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

6.1 – Introdução

Neste capítulo apresenta-se os resultados dos ensaios experimentais com as diferentes sondas de CI desenvolvidas e produzidas. Para efeitos de comparação foi utilizada a sonda comercial, a qual foi caracterizada e ensaiada nas mesmas condições. Os ensaios foram realizados usando as condições laboratoriais descritas no capítulo anterior.

As sondas foram testadas no tubo do ITER com diferentes parâmetros de inspeção, nomeadamente frequência, ganho e posição das bobinas face aos defeitos conhecidos no interior no mesmo. Foram também ensaiadas noutro tubo de material diferente (ST 52) com defeitos produzidos para o efeito, para efeitos de comparação.

6.2 – Aparato Laboratorial

A realização da validação experimental foi executada na mesa de inspeção produzida e descrita no Capítulo 5. O componente a inspecionar foi colocado na prateleira do topo. A sonda foi fixa ao componente móvel da mesa e o indicador de posição foi ajustado de acordo com a sonda a testar. A leitura da impedância das sondas é efetuada por um Nortec 500 da OLYMPUS. É um equipamento de END por CI comercial, capaz de operar numa gama de frequências entre os 50 Hz e os 12 MHz, ganho até 90 dB ajustável e com incrementos de

0.1dB e ângulo variável de 0° - 359°, ajustável de 1° em 1° [19]. O Nortec 500 que transmite os dados adquiridos para o *software* LabVIEW que recolhe, analisa, apresenta e armazena os dados das avaliações experimentais no computador. Na Figura 6.1 encontra-se ilustrado o aparato laboratorial

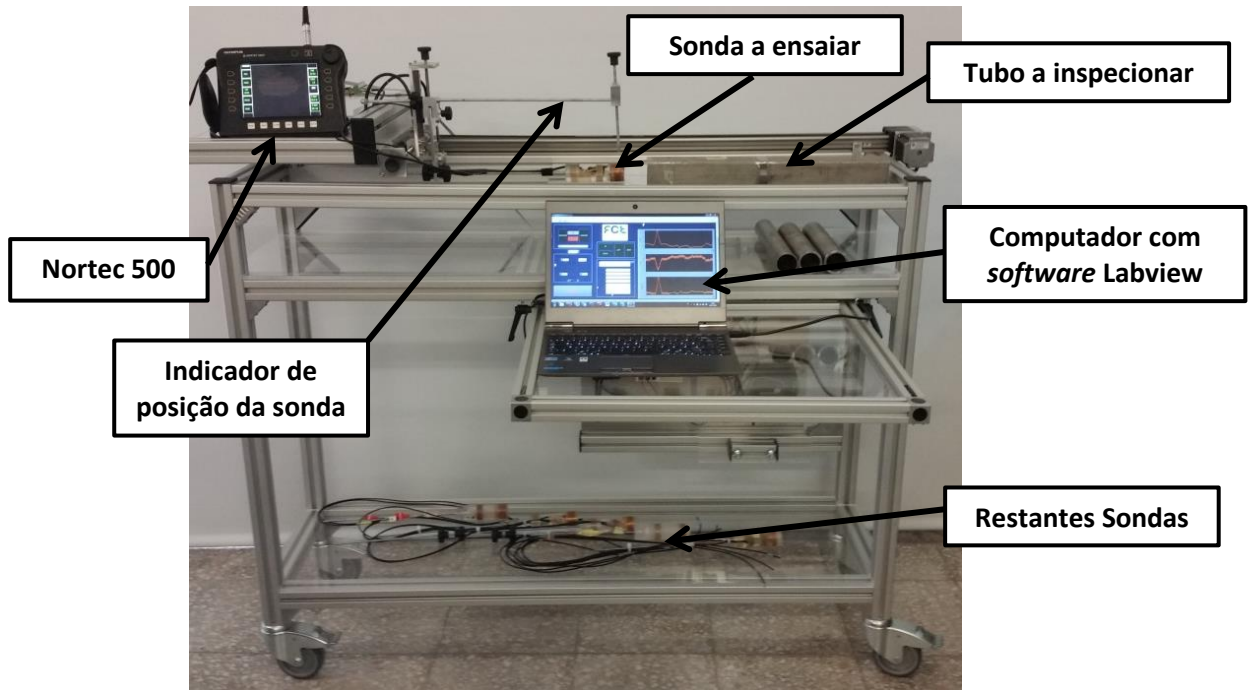


Figura 6.1 – Aparato Laboratorial.

Para além do tubo do ITER foi também inspecionado um tubo de aço ST 52. Este tubo foi maquinado para se obter um diâmetro interno que permitisse a entrada das sondas. No entanto, o torneamento provocou rugosidades da ordem de grandeza dos defeitos a produzir. Foram produzidos defeitos com dimensão superior apenas para permitir uma comparação entre as sondas num material com características diferentes. Para o efeito foram produzidos três furos de 4 mm de diâmetro sendo, um passante e dois cegos, deixando um com 0,5 mm de espessura e o outro com 1 mm. Estes três furos foram todos produzidos no mesmo ângulo com um espaçamento de 40 mm entre eles (ver Figura 6.2).

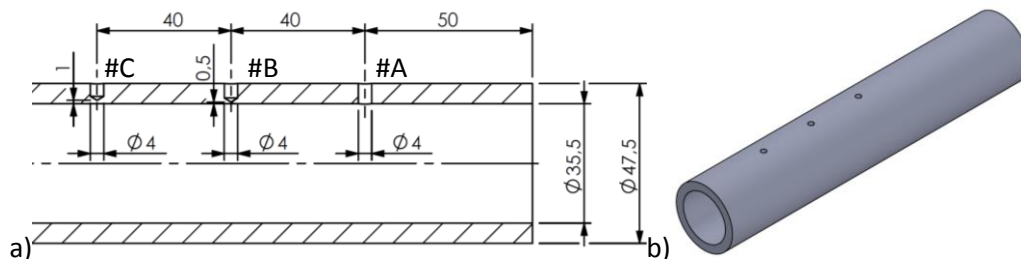


Figura 6.2 – Tubo em aço ST 52 a) Vista em corte b) Vista isométrica.

6.3 – Avaliação de Sonda Comercial

6.3.1 – Caracterização

Até ao momento tem sido utilizada uma sonda convencional concebida pela ZETEC [47] (ver Figura 6.3a) para a inspeção do tubo em causa.

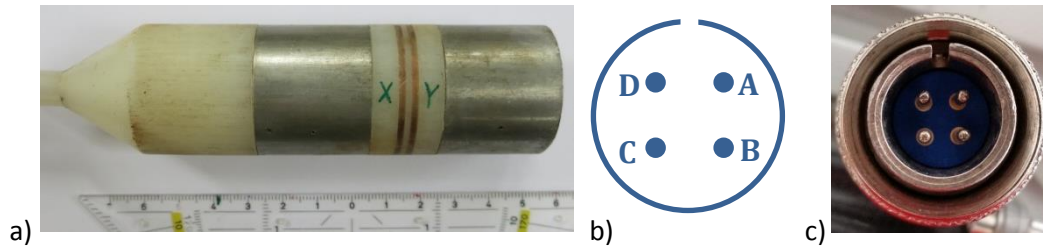


Figura 6.3 – a) Sonda comercial b) Ilustração esquemática da interface de saída c) Fotografia da interface de saída.

A sonda é constituída por duas bobinas tangenciais paralelas com o enrolamento em torno do eixo da sonda. Contém ainda dois anéis metálicos, um de cada lado das bobinas, para garantir a concentricidade das bobinas no interior do tubo e sobretudo para proteger as bobinas. Através de um cabo de 28 m, o sinal é transmitido pela interface ilustrada na Figura 6.3c. O modo de ligação da sonda não era conhecido o que, é importante para se poder caracterizar a sonda e saber operar com ela. Com o objetivo de superar esta dificuldade foi medida a resistência aos terminais (Figura 6.3b), dois a dois. Na Tabela 6.1 encontram-se os resultados obtidos.

Tabela 6.1 – Resistências medidas entre os terminais

	A	B	C	D
A	-	18,45 Ω	10,43 Ω	10,41 Ω
B	-	-	10,22 Ω	10,20 Ω
C	-	-	-	2,13 Ω
D	-	-	-	-

O diagrama esquemático mostra duas bobinas, X e Y, ligadas em série. A bobina X tem terminais A e C, e a bobina Y tem terminais D e B. Os terminais E e F estão ligados entre si.

Concluiu-se que as bobinas se encontram ligadas em série e que as ligações seriam como ilustradas no esquema da tabela. De acordo com os resultados da Tabela 6.1, o maior valor de resistência corresponde à resistência medida de ambas as bobinas logo, faz sentido a atribuição efetuada aos terminais A e B. A ligação dos terminais C e D por sua vez, sendo a sua resistência a inferior, corresponde à ligação que não contém nenhuma bobina. Este valor medido corresponde quase na totalidade à resistência dos cabos elétricos pois, subtraindo

este valor nas outras ligações obtém-se o dobro da resistência na ligação com as duas bobinas em serie (AB), do que a medida nas ligações que apenas continham uma bobina (AC, AD, CB e DB). De notar também que a diferença medida entre as ligações AC-AD e CB-DB não é significativa. Consequentemente pode-se concluir que a resistência entre E e F é desprezável.

Com o intuito de identificar qual a bobina X e qual a bobina Y foram medidas as impedâncias com recurso a um HIOKI 3532-50 LCR HiTESTER [42] aplicando sobre cada bobina uma tira de material ferromagnético, como ilustrado na Figura 6.4, verificando se a sua impedância se altera. Realizado o ensaio confirmou-se a ilustração da Tabela 6.1. Foram ainda realizados ensaios com uma sonda de Hall nos quais se concluiu que ambos os enrolamentos se encontram em sentidos opostos.

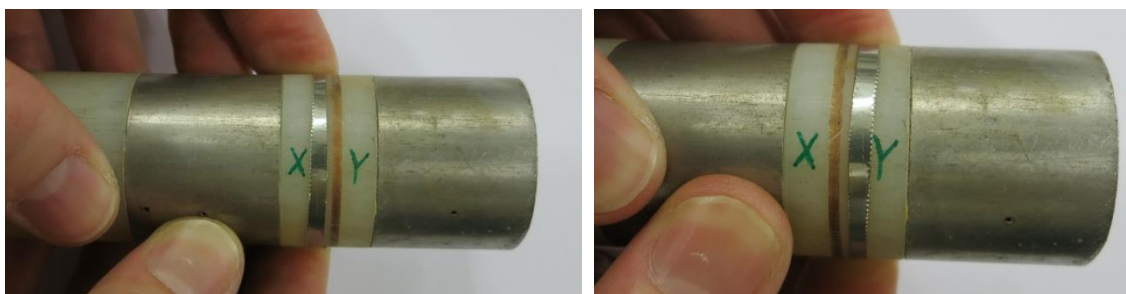


Figura 6.4 – Aplicação da tira ferromagnética às bobinas.

Posteriormente foram realizados diversos ensaios em varrimento de frequência, de 42 Hz a 1 MHz, com recurso ao *software* do leitor de impedâncias HIOKI para computador. Na Figura 6.5 encontra-se o aparato laboratorial para a realização dos ensaios.

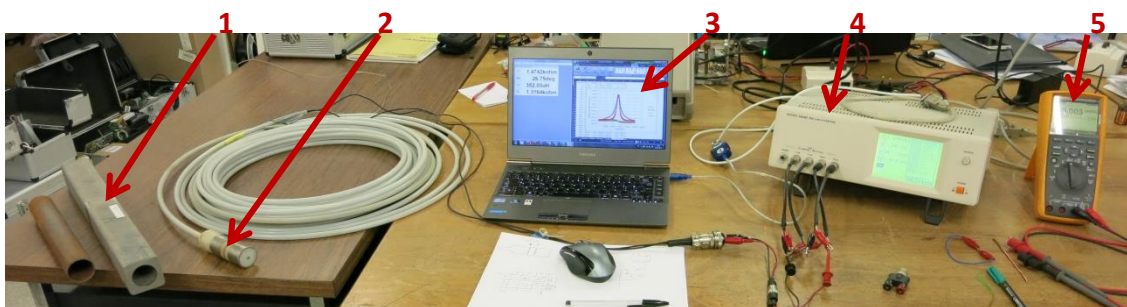


Figura 6.5 – Elementos utilizados nos ensaios de varrimento de frequências, 1) Tubo ITER; 2) Sonda comercial; 3) Computador; 4) Leitor HIOKI; 5) Multímetro.

Na Figura 6.6 apresenta-se o gráfico com a comparação da impedância medida num varrimento de frequências até 1MHz, ligando apenas os terminais A e B, com o cabo enrolado como se representa na Figura 6.5 e com o cabo desenrolado, para perceber se o enrolamento irá perturbar ensaios futuros. Os ensaios foram efetuados com a sonda em vazio e no tubo do ITER. Pode-se visualizar uma ligeira antecipação da ressonância devido ao enrolamento do cabo assim como um ligeiro decréscimo do módulo impedância. Verifica-se um atraso na

ressonância, quando no interior do tubo, assim como um decréscimo do módulo da impedância.

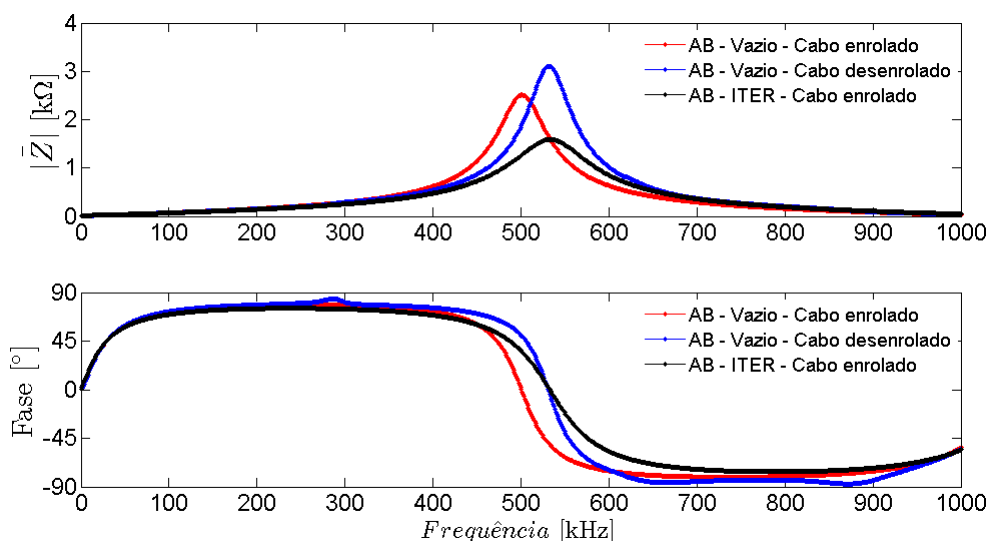


Figura 6.6 – Comparação da variação da impedância com o cabo enrolado e desenrolado ao longo de um varrimento de frequências (AB).

Repetindo o ensaio em vazio usando os terminais AC e DB verifica-se que as bobinas são iguais uma vez que obtiveram os mesmos resultados (Figura 6.7). O mesmo resultado foi obtido entre os terminais AD e CB o que confirma mais uma vez a veracidade do esquema da Tabela 6.1. Optou-se, de seguida, por comparar os ensaios usando os terminais AC e AD com o objetivo de verificar a pressuposição efetuada anteriormente de que a resistência, entre E e F da Figura 6.8 não é significativa.

Na Figura 6.8 encontra-se o resultado obtido: são semelhantes em ambos os casos, excetuando a diferença na fase a partir dos 700 MHz; é também possível visualizar a 1ª e 2ª frequência de ressonância da bobina X (que será igual para a Y).

De notar, que as frequências de ressonância obtidas ao excitar as bobinas em separado são mais baixas no que excitando ambas as bobinas em série. Sendo a frequência de ressonância inversamente proporcional à indutância seria de esperar uma frequência mais baixa quando se excitam as duas bobinas em serie. No entanto tal não acontece porque, como referido anteriormente, o sentido dos enrolamentos das bobinas é oposto. cada bobina gera o campo magnético num sentido o que causa o seu anulamento baixando assim a indutância total da bobina e consequentemente aumenta a frequência de ressonância.

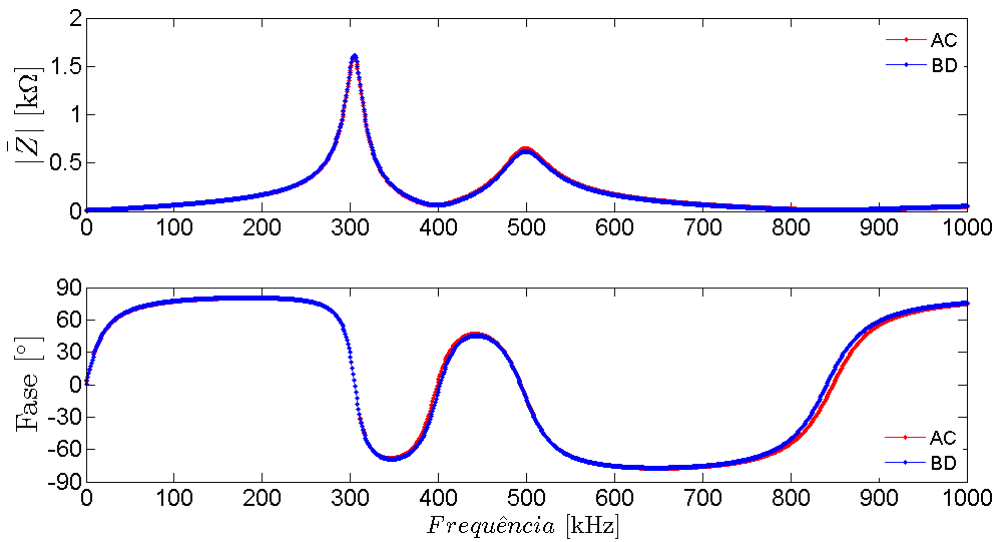


Figura 6.7 – Comparação da variação da impedância entre as extremidades AC e BD.

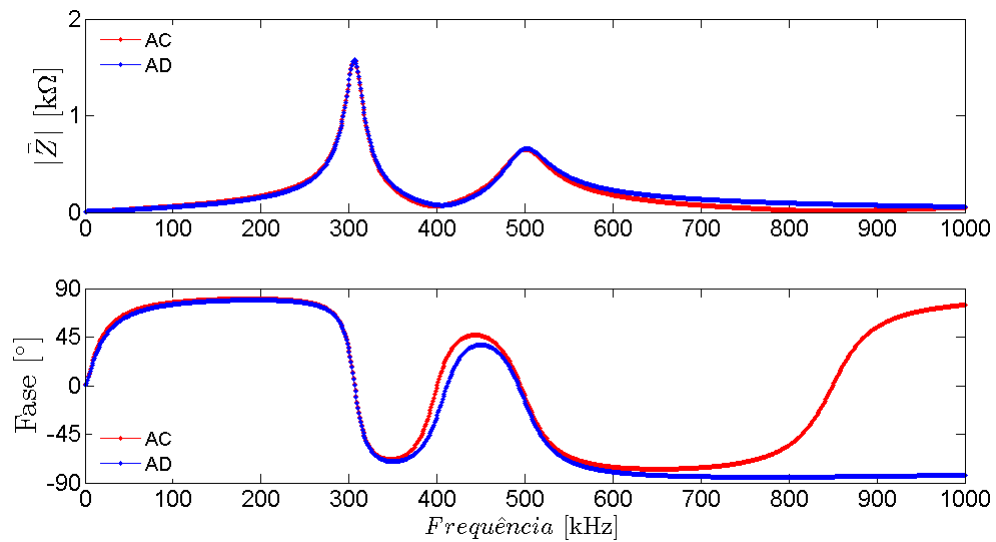


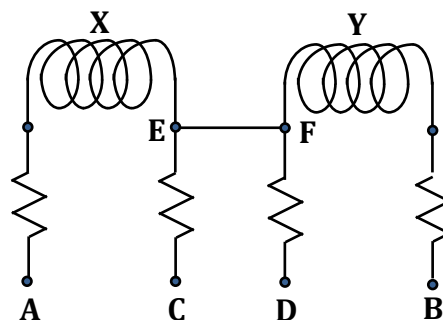
Figura 6.8 – Comparação da variação da impedância entre as extremidades AC e AD.

6.3.2 – Ensaios

Foram realizados ensaios com a sonda comercial no tubo do ITER com o intuito de perceber que defeitos eram realmente detetados e com que clareza. A excitação e recepção da sonda podem ser realizadas de acordo com abordagens diferentes, variando o seu tipo de ligação. Na Tabela 6.2 encontram-se as configurações utilizadas em cada abordagem, com base nas terminais do esquema. Na abordagem 1 ao excitar A e B separadamente e ligando C e D ao *ground*, uma vez que os enrolamentos têm sentidos opostos é obtido um campo no mesmo sentido permitindo um campo magnético superior ao inspecionar os componentes e obtém-se uma frequência de ressonância mais baixa.

Tabela 6.2 – Abordagens utilizadas na inspeção com a sonda comercial.

Abordagem	Excitação	Recepção	Tipo de ligação
1	A-C B-D	A-B	Bridge diferencial
2	A-C	A-C	Absoluto
3	A-C	D-B	Reflexão <i>driver-pickup</i>
4	A-B	A-B	Sonda absoluta – leitura diferencial
5	A-B	A-C	-



Na Figura 6.9 ilustra-se os resultados obtidos da 1ª abordagem a 200 kHz. É possível observar, principalmente na componente imaginária, as três perturbações causadas pelos três defeitos presentes no tubo, nas posições aproximadas de 32 mm, 80 mm e 130 mm. O ensaio foi realizado na direção do menor defeito para o maior, relevando uma coerência em relação à amplitude do sinal. A amplitude do defeito mais pequeno é, do nível do ruído, o que pode passar despercebido. Estes foram os melhores resultados obtidos para a abordagem 1. As restantes abordagens mostraram-se ineficazes na deteção dos defeitos como se pode ver na Figura 6.10 que foi um dos melhores resultados para a abordagem 2. No Anexo 7 encontra-se a Tabela A5 com todos os parâmetros e ensaios realizados com esta sonda assim como os resultados obtidos.

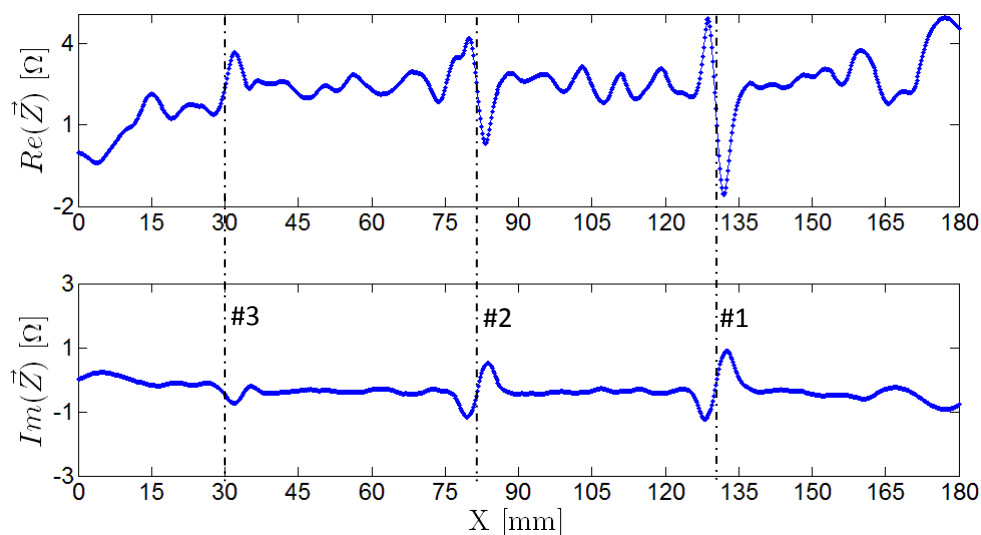


Figura 6.9 – Ensaio a 200 kHz com a abordagem 1 no tubo do ITER.

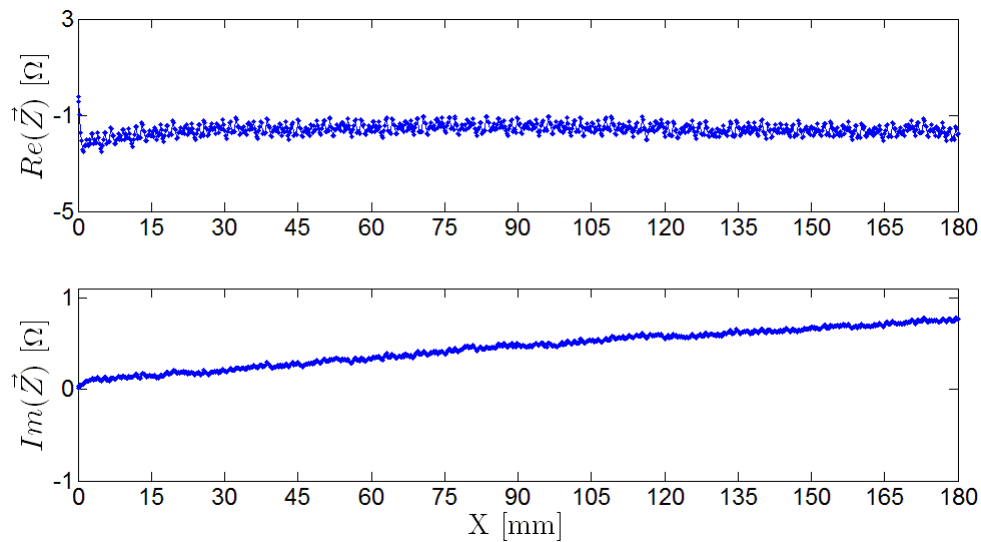


Figura 6.10 – Ensaio a 100 kHz com a abordagem 2 no tubo do ITER.

Na Figura 6.11 apresenta-se o resultado obtido ao inspecionar o tubo em aço ST 52. Como é possível observar não sobressai nenhum sinal que possa acusar a presença de um defeito da dimensão dos existentes, especialmente na posição em que deveriam estar (20, 60 e 100 mm).

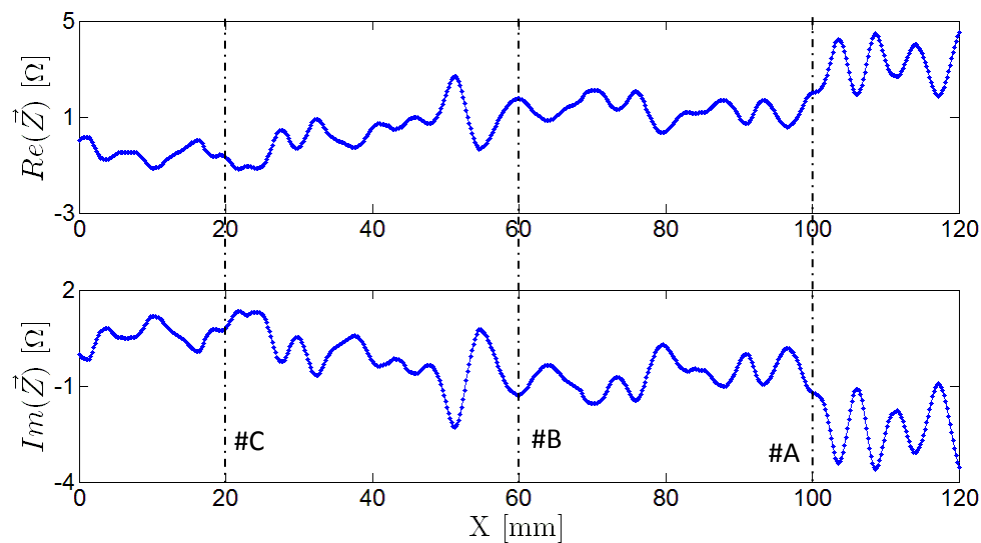
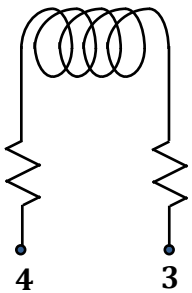
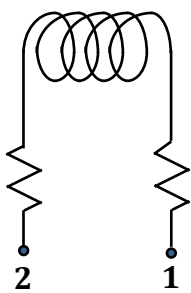


Figura 6.11 – Ensaio a 500 MHz com a abordagem 1 no tubo em aço ST 52.

6.4 – Validação da Configuração 1 – Sonda Convencional

Para este conceito a excitação e receção da sonda podem ser realizadas de acordo com diferentes abordagens variando o seu tipo de ligação. Esta sonda é uma réplica da sonda convencional mas, não existe uma ligação interna (E-F) como na sonda comercial apresentada anteriormente na Tabela 6.2 o que permite mais possibilidades de ligação dos terminais Na Tabela 6.3 encontram-se as configurações utilizadas em cada abordagem com base nas terminais do esquema presente na mesma.

Tabela 6.3 – Abordagens utilizadas para os ensaios realizados com a sonda convencional

Abordagem	Excitação	Receção	Tipo de ligação	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> B1  </div> <div style="text-align: center;"> B2  </div> </div>
1	1-2 3-4	1-4	Bridge diferencial	
2	1-2	1-2	Absoluto	
3	1-2	3-4	Reflexão <i>driver-pickup</i>	
4	1-4	1-4	Sonda absoluta – leitura diferencial	
5a	1-4	1-2		
5b	1-4	3-4		

6.4.1 – Resultados dos ensaios ao tubo do ITER

Na Figura 6.12, Figura 6.13 e Figura 6.14 encontram-se os resultados desta sonda com a abordagem 1 a 300, 900 e 3000 kHz respetivamente. É possível assinalar as três perturbações causadas pelos defeitos com uma relação sinal/ruído ligeiramente superior à sonda comercial. Na 2ª abordagem apesar da baixa qualidade do sinal foram detetados os três defeitos, o que não foi possível com a sonda comercial, como ilustrado na Figura 6.15. O sinal ao longo do tubo tem uma grande variação o que se deve ao tipo de abordagem ser absoluto. Tal não acontece nas abordagens diferenciais pois a variação da impedância é sempre a diferença entre posições próximas. Nas restantes abordagens os resultados pioram. No Anexo 8 encontram-se os resultados dos ensaios feitos com esta sonda nas diferentes abordagens, a Tabela A6 lista os ensaios realizados.

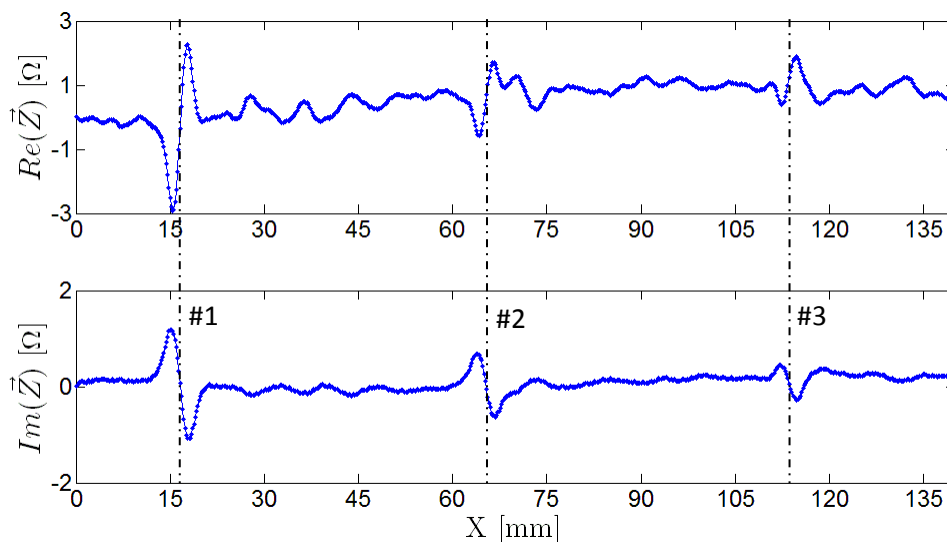


Figura 6.12 – Ensaio a 300 kHz com a abordagem 1.

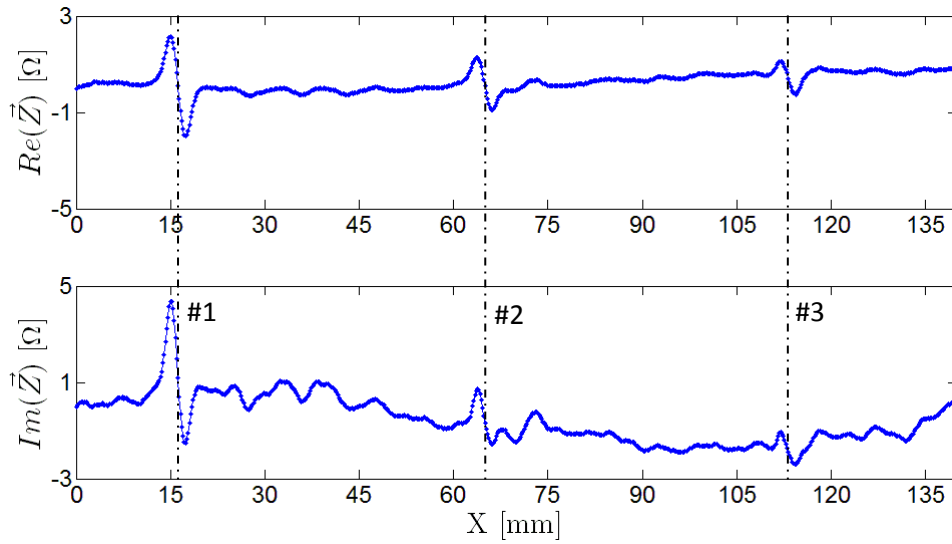


Figura 6.13 – Ensaio a 900 kHz com a abordagem 1.

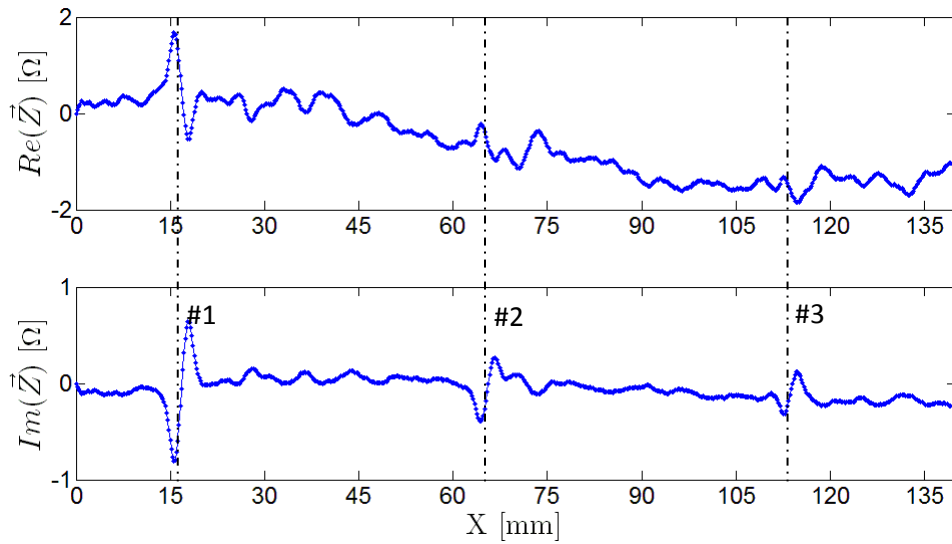


Figura 6.14 – Ensaio a 3 MHz com a abordagem 1.

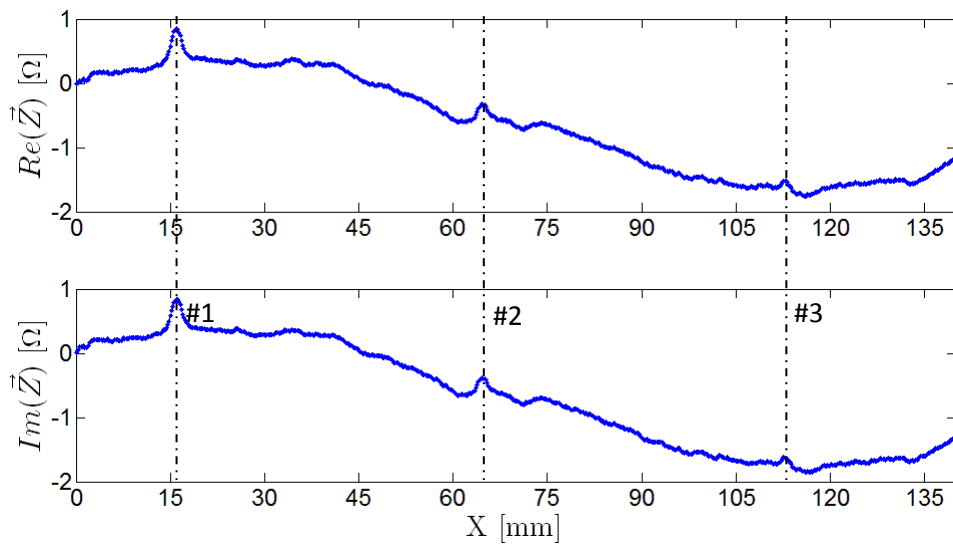


Figura 6.15 – Ensaio a 900 kHz com a abordagem 2.

6.4.2 – Resultados dos ensaios ao tubo de aço ST 52

Na Figura 6.16 apresenta-se o resultado obtido ao inspecionar o tubo em aço ST 52. Como é possível observar, não sobressai nenhum sinal que possa acusar a presença de um defeito da dimensão dos existentes, especialmente na posição que deveriam estar (20, 60 e 100 mm).

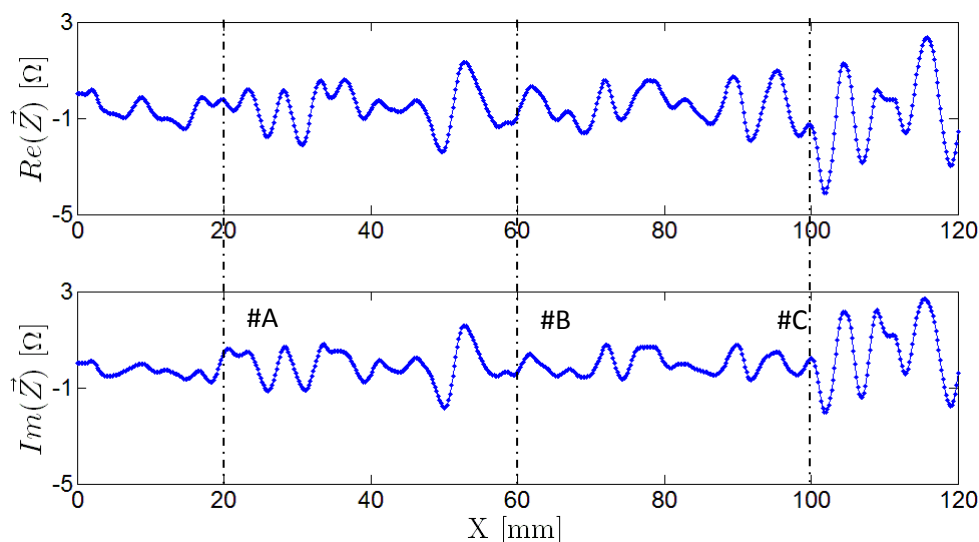


Figura 6.16 – Ensaio a 500 kHz com a abordagem 1.

6.5 – Validação da Configuração 2 – Sonda com três bobinas tangenciais

Para esta configuração de sonda foram usadas duas abordagens. A primeira consistiu em excitar uma bobina de uma das extremidades e fazer uma leitura diferencial com as outras duas portanto, modo reflexão diferencial. A outra abordagem consistiu em excitar a bobina central e fazer a leitura em diferencial com as restantes duas. O objetivo desta abordagem é a melhor relação sinal/ruído que o modo de reflexão diferencial pode proporcionar.

6.5.1 – Resultados dos ensaios ao tubo do ITER

Na Figura 6.17 encontra-se o resultado obtido ao excitar a bobina central e ler em diferencial as duas dos extremos. Como é possível visualizar são detetados os três defeitos. No entanto, o defeito menor não produz um sinal equilibrado e a sua amplitude é do nível do ruído podendo desta maneira passar despercebido. A variação brusca perto do fim dos ensaios deve-se à presença da soldadura existente no tubo. Esta configuração não permitiu uma melhoria visível da sonda convencional como era esperado. Na Figura 6.18 encontra-se o resultado obtido ao usar a outra abordagem: os defeitos estão representados, mas sem comparação em relação à amplitude gerada pelos mesmos, sendo que o defeito menor só é reconhecido como tal porque já é conhecida *a priori* a sua existência. Estes ensaios foram os

melhores obtidos no entanto encontra-se no Anexo 9 os restantes resultados dos ensaios realizados com esta sonda nas diferentes abordagens.

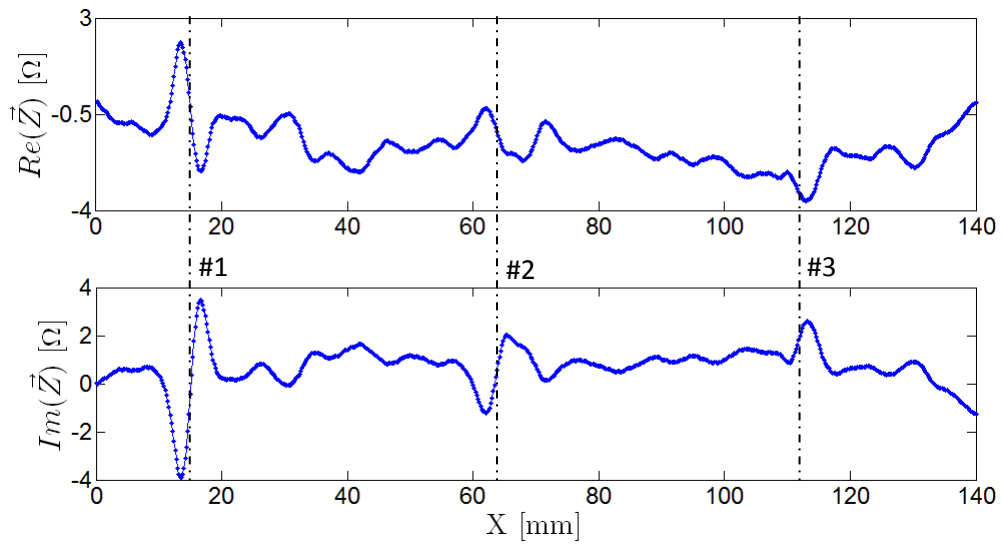


Figura 6.17 – Ensaio a 500 kHz com excitação na bobina central com leitura diferencial nas bobinas esquerda e direita.

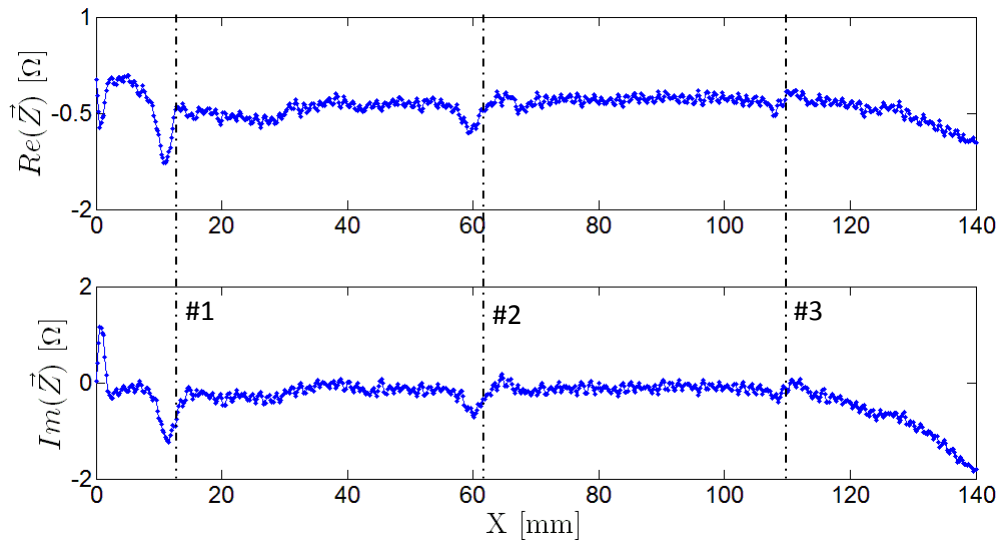


Figura 6.18 – Ensaio a 400 kHz com excitação na bobina direita com leitura diferencial nas bobinas central e esquerda.

6.5.2 – Resultados dos ensaios ao tubo de aço ST 52

Na Figura 6.19 apresenta-se o resultado obtido ao inspecionar o tubo em aço ST 52. Como é possível observar, não sobressai nenhum sinal que possa acusar a presença de um defeito da dimensão dos existentes, especialmente na posição que deveriam estar (20, 60 e 100 mm).

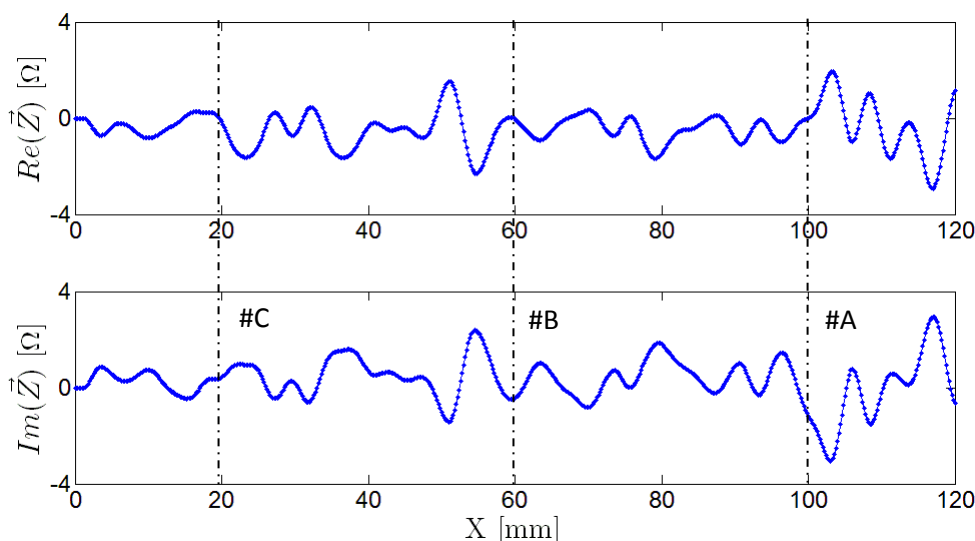


Figura 6.19 – Ensaio a 500 kHz com excitação na bobina Bc com leitura diferencial nas Be e Bd.

6.6 – Validação da Configuração 3 – Excitação axial com leitura em bobinas espirais trapezoidais planas

Nos ensaios efetuados com esta sonda foi usada uma bobina sensível ou duas em diferencial pelo que cada ensaio apenas cobria uma parte do perímetro do tubo. Assim, foram definidas posições do defeito relativamente à bobina sensível que se encontram representadas na Figura 6.20. A azul claro assinala-se o defeito menor (quando está na posição 5) e a azul mais escuro o defeito intermédio; a vermelho está representado o enrolamento de excitação.

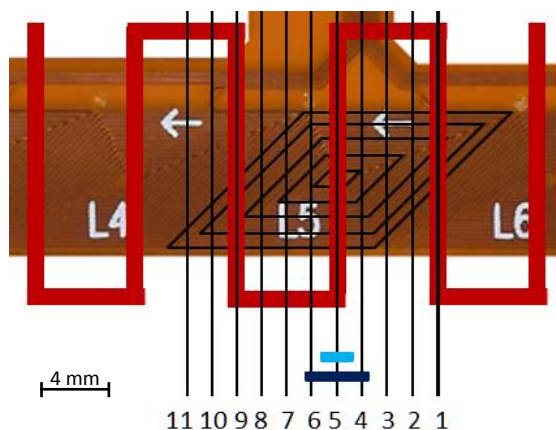


Figura 6.20 – Posições utilizadas na configuração 3.

Devido à restrição de apenas se poder ler uma bobina sensível de cada vez (devido ao equipamento disponível), só foi possível inspecionar um defeito, por ensaio, porque os três defeitos encontram-se em faces diferentes do tubo do ITER.

6.6.1 – Resultados dos ensaios ao tubo do ITER

Na Figura 6.21 ilustra-se um varrimento ao tubo completo, por troços. Conforme referido, no Capítulo 3.2, os troços devem-se aos defeitos se localizarem em sítios diferentes do perímetro do tubo e a inspeção usar uma bobina sensível de cada vez, que apenas cobre 1/8 do perímetro. O varrimento foi feito por ordem decrescente em relação ao tamanho dos defeitos apesar de o primeiro defeito não ter o sinal com maior amplitude. Tal deve-se à saída de grande parte da sonda do interior do tubo fazendo assim variar o *lift-off*; por outro lado o efeito de bordo também pode contribuir para esta situação. É possível evidenciar a capacidade que esta sonda tem para detetar todos os defeitos de forma muito clara e com uma excelente relação sinal/ruído. Devido aos muito bons resultados obtidos, fazia apenas sentido aprofundar o estudo desta configuração com o defeito mais pequeno, defeito este que a sonda comercial não era capaz de detetar.

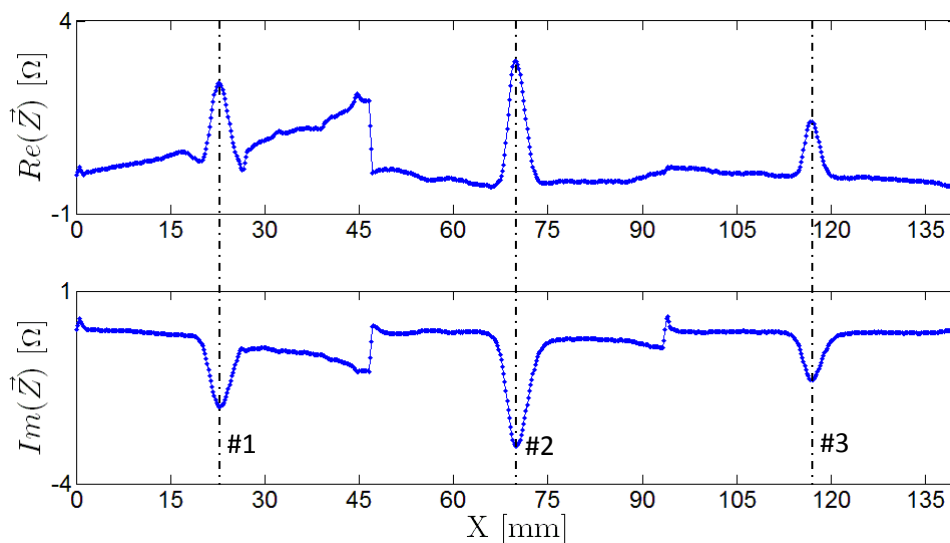


Figura 6.21 – Varrimento dos três defeitos a 500 kHz na posição 9.

Na Figura 6.22 e Figura 6.23 encontram-se os resultados obtidos na inspeção ao defeito mais pequeno, quando este passa pelo centro da bobina sensível. Como é possível visualizar, o defeito está bem definido em frequências significativamente diferentes de 250 e 5.000 kHz. Apesar da leitura ser feita aos terminais da mesma bobina, o sinal corresponde a um sinal característico das sondas diferenciais, isto é devido à configuração geométrica da sonda, nomeadamente devido ao fato de a excitação ser realizada por um filamento exterior (reflexão) e de as CI serem perturbadas, pela presença dos defeitos, de forma simétrica e em relação ao

centro das bobinas sensíveis. Isto provoca uma troca de sinal da tensão induzida e consequentemente um sinal em forma de sinal diferencial.

Na Figura 6.24 é ilustrado o resultado, quando o defeito passa entre duas bobinas sensíveis diferentes e, simultaneamente, ao longo do enrolamento de excitação. O sinal gerado é uma parábola com uma amplitude superior. Neste caso o tipo de sinal tem a forma típica de um sinal de uma sonda absoluta. Isto deve-se ao fato de a bobina sensível apenas cobrir a zona do defeito com uma extremidade. Caso fosse sobreposto o sinal desta bobina com o sinal da bobina adjacente (L5 com L6) o sinal obtido já teria a forma típica de um sinal diferencial. Representou-se igualmente o resultado da simulação numérica, para possível comparação com o resultado experimental onde se ver que a simulação foi uma aproximação da realidade relativamente boa. De referir que os resultados são apresentados em termos relativos.

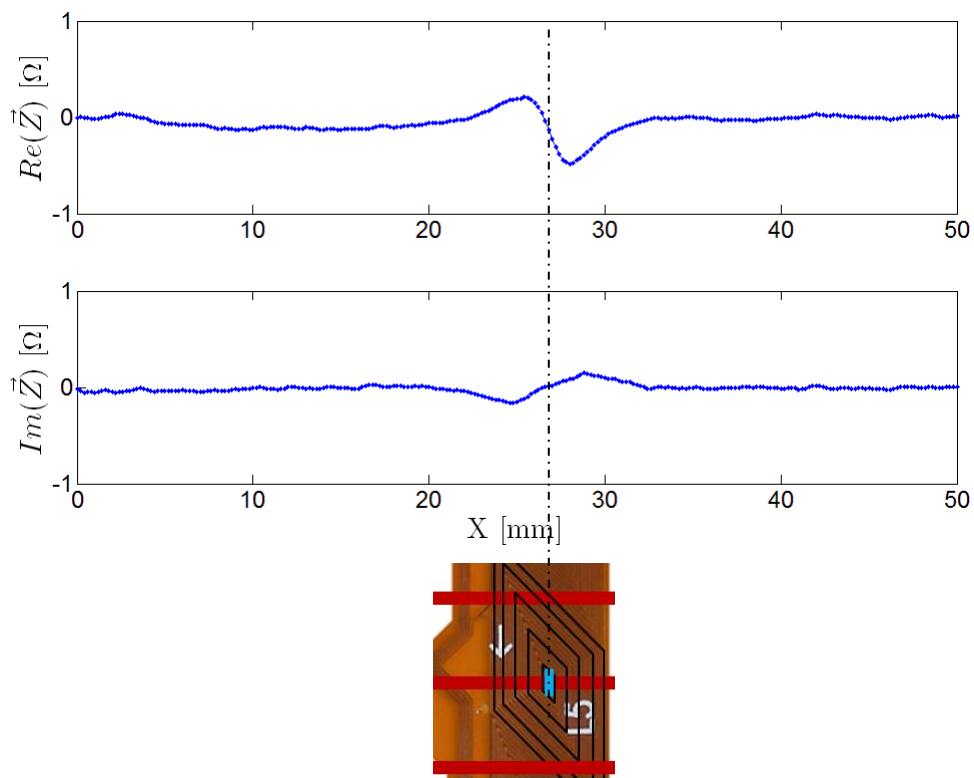


Figura 6.22 – Ensaio a 250 kHz na posição 5 ao defeito menor.

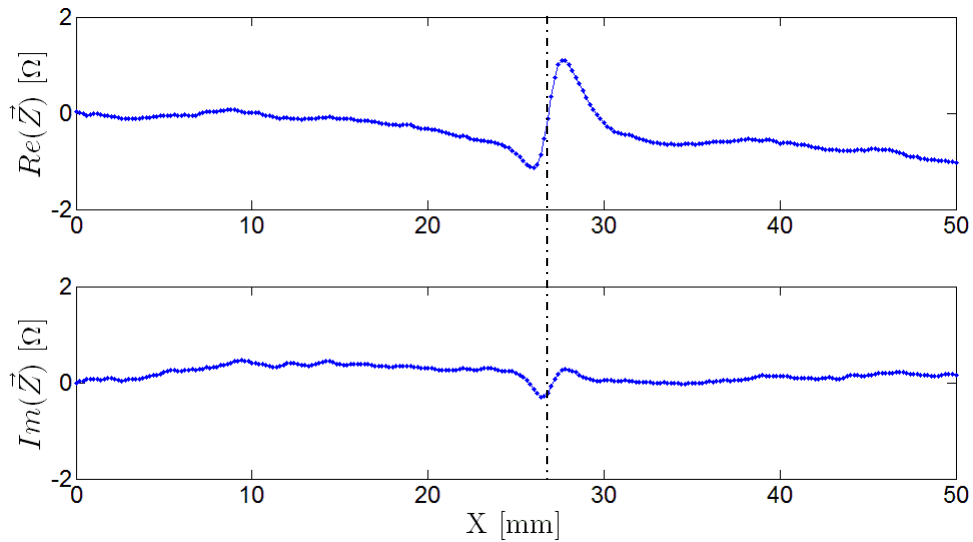


Figura 6.23 – Ensaio a 5 MHz na posição 5 ao defeito menor.

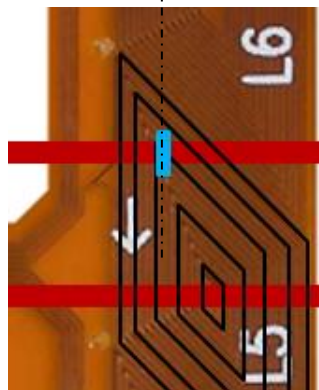
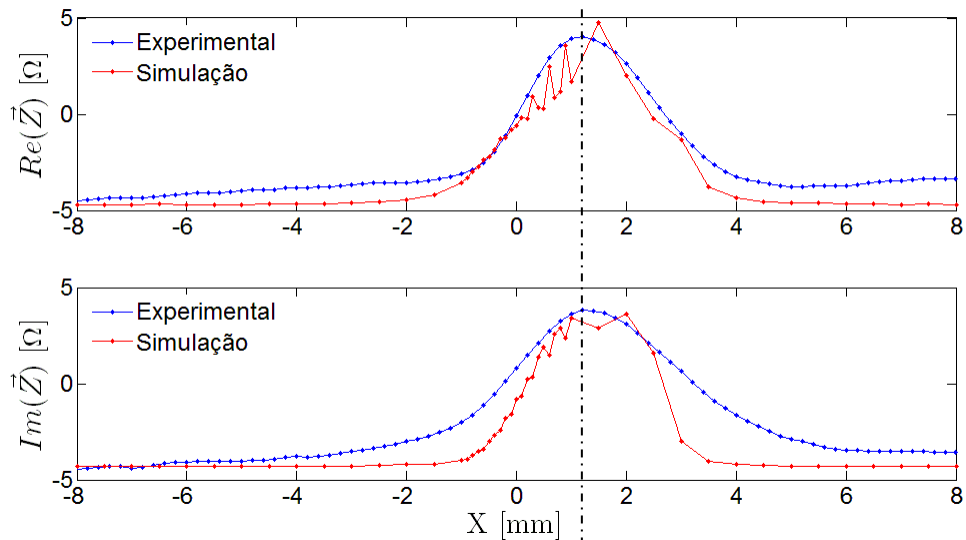


Figura 6.24 – Ensaio a 500 kHz na posição 1 ao defeito menor.

Na Figura 6.25 apresenta-se o resultado obtido, no plano real, de duas bobinas sensíveis consecutivas, variando a posição a 500 kHz. Estas posições são relativas à bobina L5, como representado na Figura 6.20. É possível reparar que a bobina L5 deteta a presença do defeito em todas as posições exceto na posição 7. Esta posição corresponde à zona equidistante entre

os enrolamentos de excitação. A sua não detecção deve-se ao fato de, nesta posição, não existirem praticamente correntes induzidas, pois os enrolamentos de excitação encontram-se equidistantes dos defeitos. Esta sonda apresenta posições de sombra entre todos os enrolamentos de excitação consecutivos. O defeito na posição 7 atravessa a bobina 5, mas não é acusado e na posição 8, apesar de atravessar apenas uma ponta da bobina L4, já é detetado, pois está mais próximo da bobina de excitação. No Anexo 10 encontra-se os restantes ensaios e resultados obtidos.

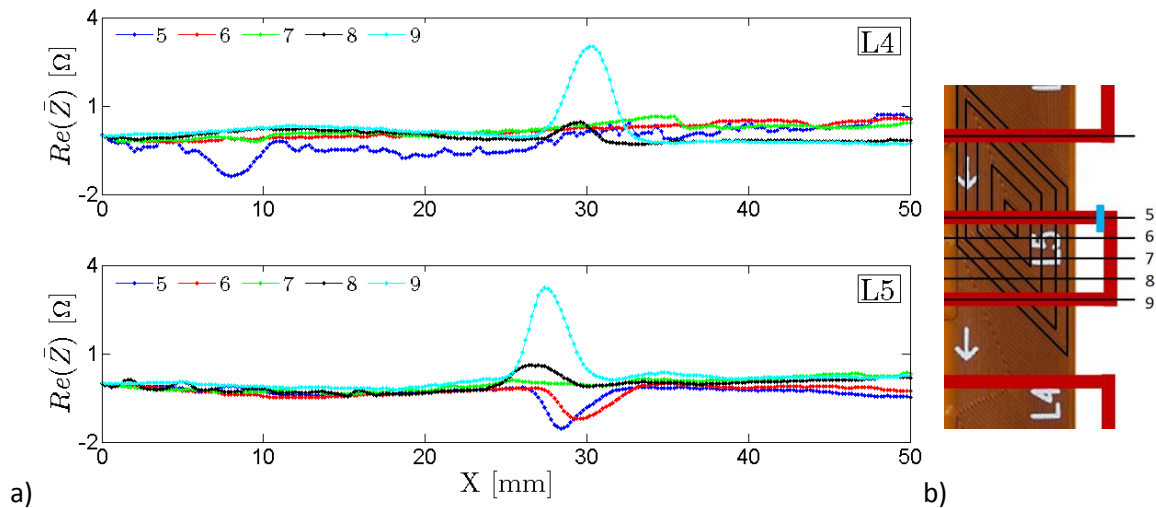


Figura 6.25 – a) Ensaio a 500 kHz ao defeito menor com diferentes posições; b) Posições.

6.6.2 – Resultados dos ensaios ao tubo de aço ST 52

Na Figura 6.26 apresenta-se o resultado obtido ao inspecionar o tubo em aço ST 52. Como é possível observar, apenas o 1º defeito, relativo ao furo passante com 4 mm de diâmetro, foi detetado aos 20 mm.

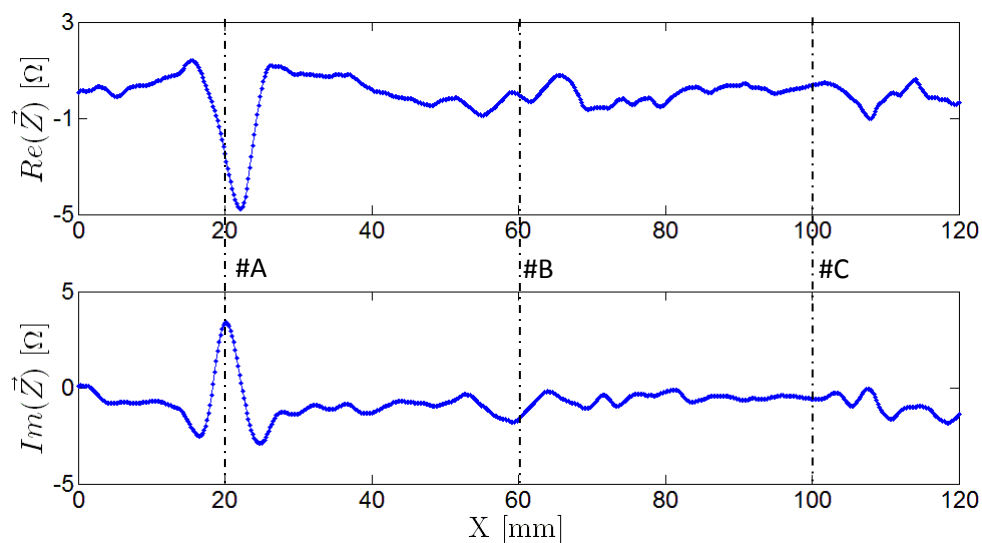


Figura 6.26 – Ensaio a 500 kHz na posição 9.

6.7 – Validação da Configuração 4 – Excitação tangencial com leitura em bobinas espirais trapezoidais

Esta sonda também funciona em modo de reflexão com bobinas sensíveis iguais às da configuração anterior mudando apenas a orientação da bobina de excitação que é tangencial. Nos ensaios efetuados com esta sonda uma bobina sensível ou duas em diferencial, cada ensaio apenas cobriu uma parte do perímetro do tubo. Assim, foram definidas posições do defeito relativamente à bobina sensível a ser utilizada, as quais são apresentadas na Figura 6.27. A azul claro assinala-se o defeito menor quando está na posição 1 e a azul mais escuro o defeito intermédio; a vermelho está representado o enrolamento de excitação.

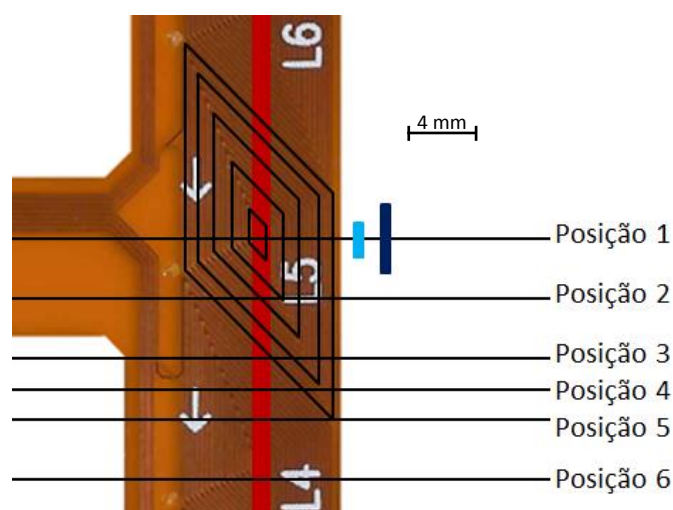


Figura 6.27 – Posições no defeito em relação às bobinas sensíveis.

6.7.1 – Resultados dos ensaios ao tubo do ITER

A sonda usada nos ensaios seguintes continha uma excitação com 15 enrolamentos tangenciais e bobinas espiral trapezoidais em substrato flexível vAx2x8 da Tabela 3.8 para a leitura. Na Figura 6.28 ilustra-se um varrimento ao tubo completo por troços por ordem crescente em relação ao tamanho dos defeitos. Os troços devem-se a, como já foi referido, os defeitos estarem em locais diferentes do perímetro do tubo e a inspeção usar apenas uma bobina sensível de cada vez, que cobre apenas 1/8 do perímetro. De notar a excelente relação sinal/ruído obtida neste resultado que se destaca especialmente no plano imaginário. Os sinais dos três defeitos encontram-se perfeitamente definidos e em proporções coerentes com as dimensões dos defeitos. A variação do sinal, presente sobretudo, no plano real deve-se a heterogeneidades no próprio material uma vez que esta variação é constante em todos os ensaios realizados. Mais uma vez, revelou-se interessante aprofundar o estudo desta configuração com apenas o defeito mais pequeno. No Anexo 11 encontram-se os restantes ensaios realizados com esta sonda.

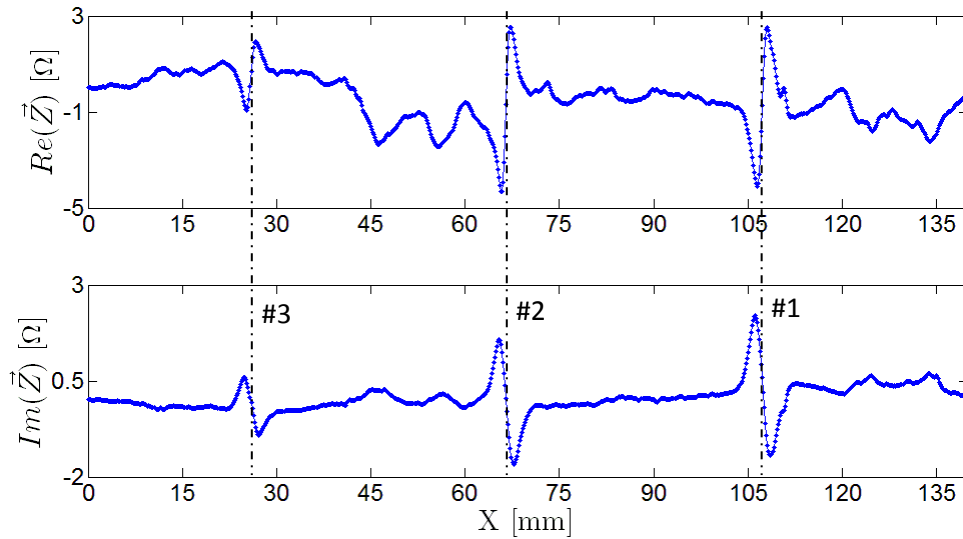


Figura 6.28 – Ensaio a 500 kHz na posição 1.

Na Figura 6.29 apresenta-se o resultado obtido na inspeção ao defeito mais pequeno, quando este passa pelo centro da bobina sensível. Foram realizados dois ensaios idênticos usando bobinas sensíveis diferentes para comparação. Como é possível visualizar, o defeito aparece bem definido em ambas as bobinas exibindo mais uma vez o sinal característico das sondas diferenciais conforme explicado na configuração anterior.

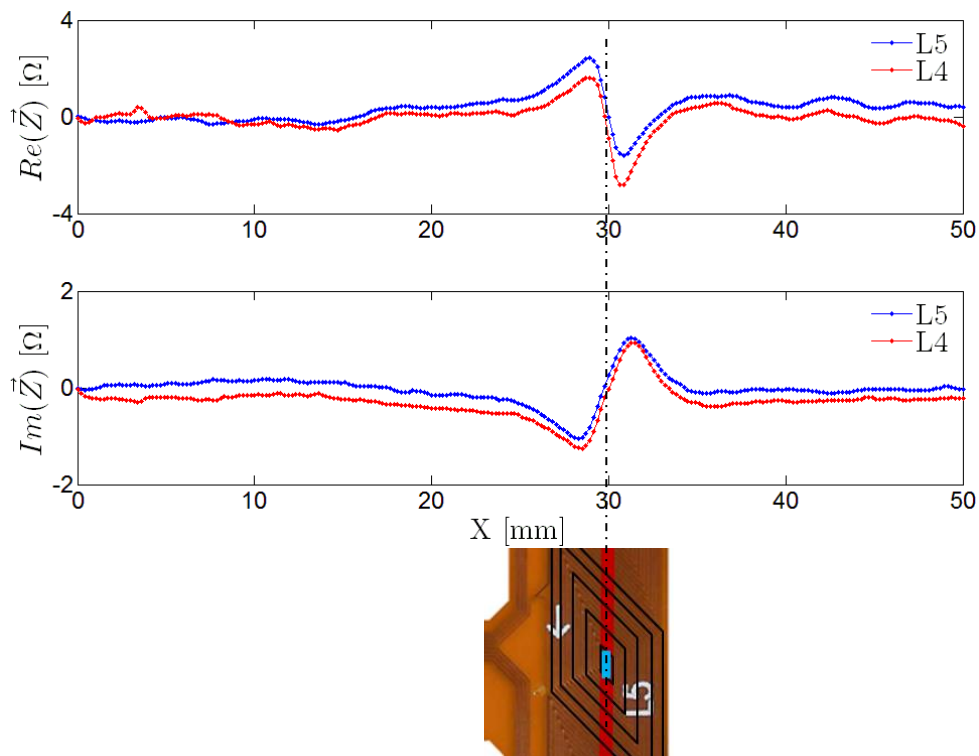


Figura 6.29 – Ensaio a 500 kHz ao defeito menor na posição 1.

Na Figura 6.30 encontra-se o resultado da simulação numérica para comparação com o resultado experimental. A simulação numérica revelou-se coerente face ao resultado obtido experimentalmente. De referir que os resultados estão apresentados em termos relativos.

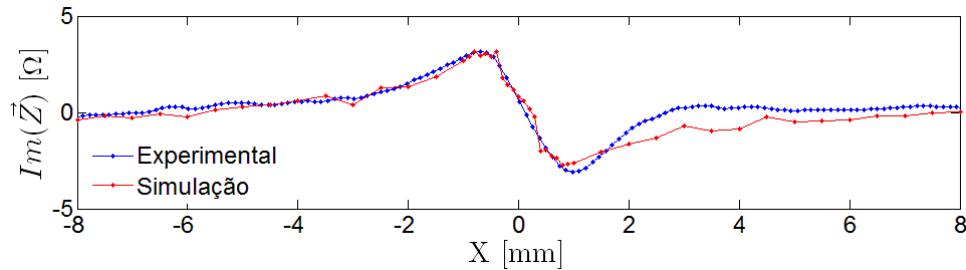


Figura 6.30 – Ensaio a 500 kHz ao defeito menor na posição 1.

Na Figura 6.31 encontra-se o resultado obtido de uma bobina sensível variando a posição. Estas posições são todas relativas à bobina L5, conforme representado na Figura 6.27. Como pode ser visualizado, o defeito não é detetado na posição 5 em que apenas passa por uma extremidade da bobina sensível. No entanto, como se representa na Figura 6.27, nessa zona, a excitação já está longe sendo essa a razão para não ser detetado. Este pormenor não é muito relevante porque apesar de esta bobina não o detetar, para a bobina adjacente, esta posição, corresponde à posição 2 na qual o defeito já será facilmente detetado.

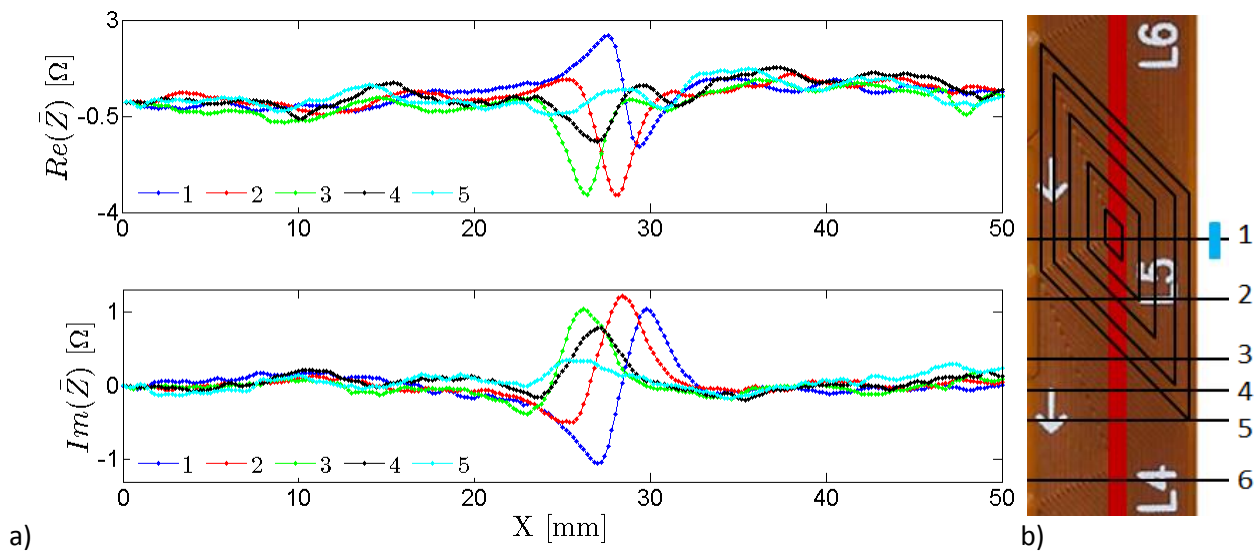


Figura 6.31 – a) Ensaio a 500 kHz ao defeito menor com diferentes posições; b) Posições.

Na Figura 6.32 encontra-se a inspeção do defeito menor, com diferente número de espiras na bobina de excitação (10, 20 e 40). Como se pode visualizar, à medida que é aumentado o número de espiras de excitação, o sinal vai ficando melhor definido e com menos ruído. De notar que, o aumento do número de enrolamentos não significa um aumento da largura do enrolamento, mas sim da profundidade.

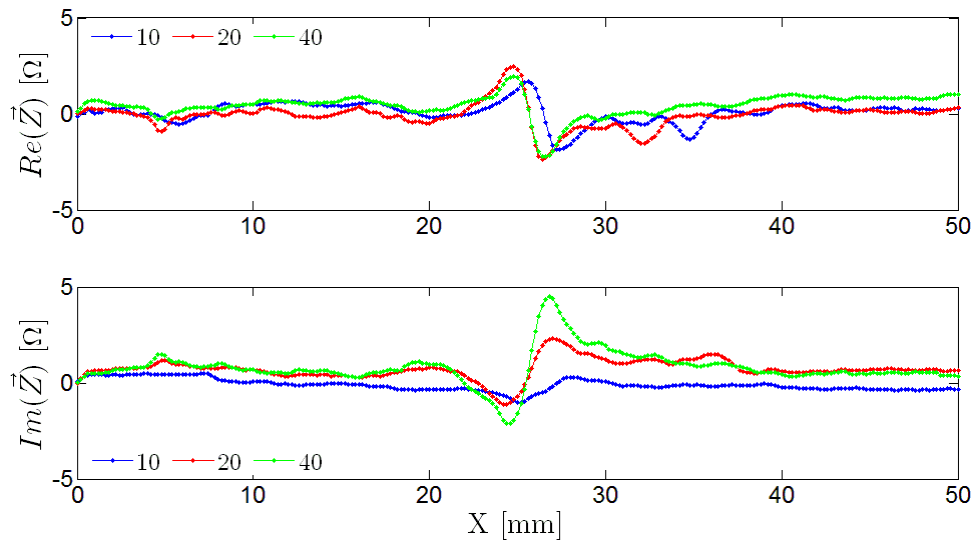


Figura 6.32 – Ensaio a 500 kHz ao defeito menor com diferente número de espiras na excitação e leitura vAx2x8.

Esta configuração, contém três sondas cujas diferenças estão no número de espiras da excitação e no número de bobinas trapezoidais sensíveis. Na Figura 6.33 encontra-se o resultado da inspeção do defeito intermédio usando a sonda constituída por 80 enrolamentos tangenciais e as bobinas espiral trapezoidais em substrato flexível vAx4 da Tabela 3.8. Esta bobina sensível é constituída por quatro espirais trapezoidais relativamente maiores que as usadas anteriormente pois têm de cobrir o mesmo perímetro.

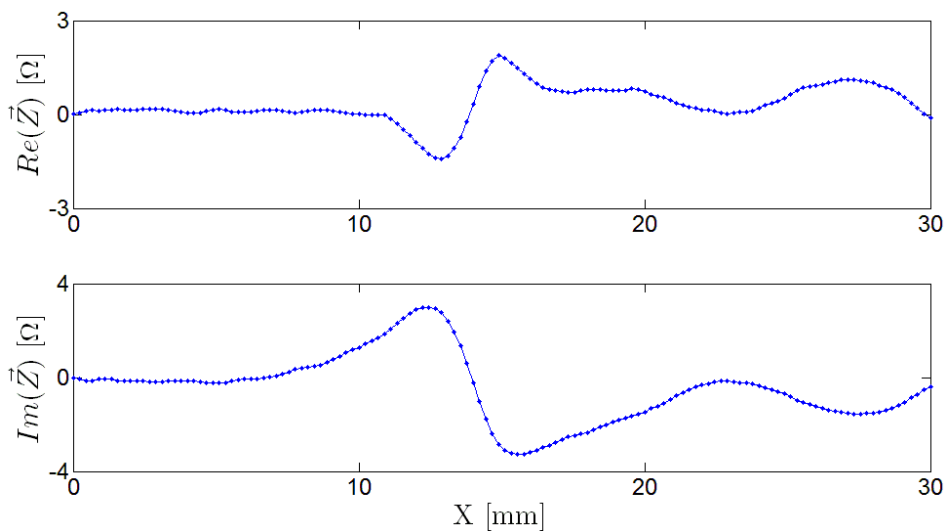


Figura 6.33 – Ensaio a 500 kHz ao defeito intermédio com defeito a passar pelo centro da bobina L3 e bobina sensível vAx4.

Esta combinação revelou-se pior em relação à anterior pois a amplitude do sinal é da ordem de grandeza do ruído e esta sonda não foi capaz de detetar o defeito menor. No Anexo 12 encontram-se os restantes ensaios realizados com esta sonda.

Na Figura 6.34 apresenta-se a inspeção do defeito menor com diferente número de enrolamentos de excitação (10, 20 e 40). Nesta sonda a bobina sensível usada foi a vAx16 da Tabela 3.8. Esta bobina sensível é constituída por 16 espirais trapezoidais significativamente mais pequenas. Como se pode visualizar, tal como anteriormente, à medida que é aumentado o número de enrolamentos de excitação o sinal é melhorado. Devido aos três enrolamentos de excitação presentes na sonda, o número de cabos utilizados para efetuar a ligação da sonda ao aparelho de medida (Nortec) foi superior, o que pode explicar o ruído evidenciado no gráfico. No Anexo 13 encontram-se os restantes ensaios realizados com esta sonda.

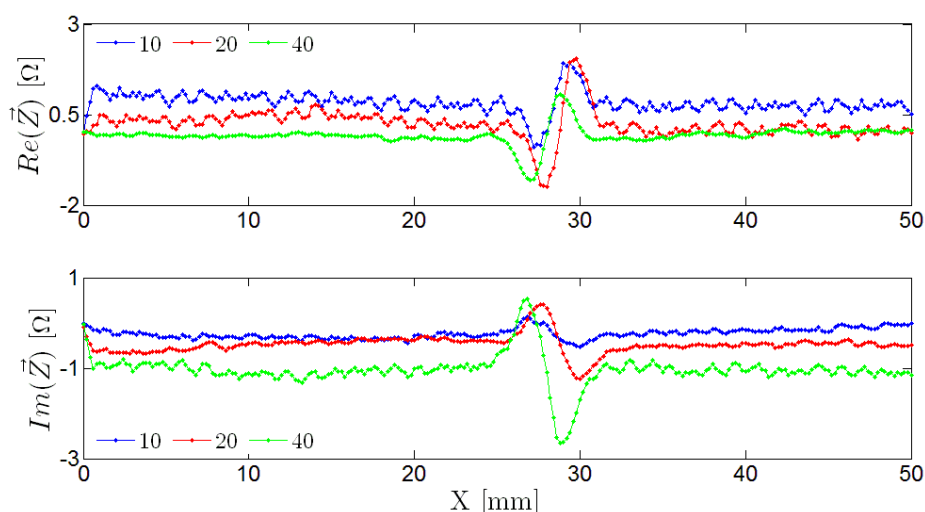


Figura 6.34 – Ensaio a 500 kHz ao defeito menor com diferente número de espiras na excitação e leitura vAx16.

6.7.2 – Resultados dos ensaios ao tubo de aço ST 52

Na Figura 6.35 apresenta-se o resultado obtido ao inspecionar o tubo em aço ST 52. Como é possível observar, apenas o 1º defeito, relativo ao furo passante com 4 mm de diâmetro, é detetado aos 20 mm.

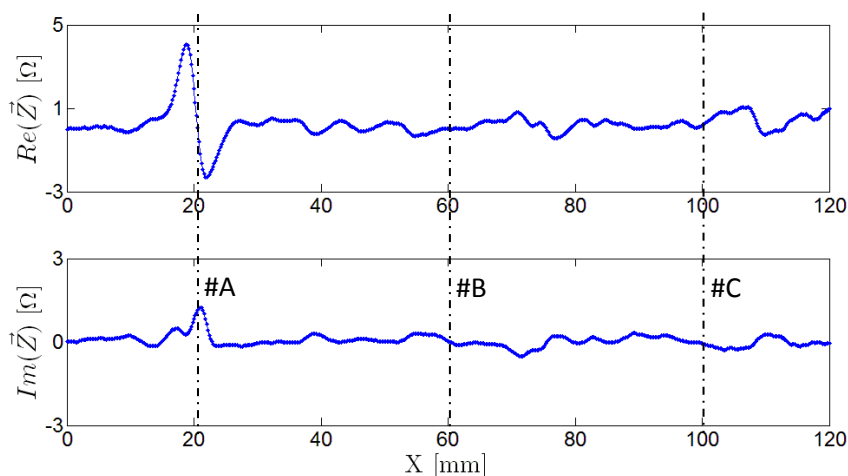


Figura 6.35 – Ensaio a 500 kHz na posição 1 com tubo em aço ST 52.

6.8 – Validação da Configuração 5 – Excitação e leitura com bobinas espirais trapezoidais planas

Nos ensaios efetuados com esta sonda foi também apenas usada uma bobina sensível ou duas em diferencial, pelo que cada ensaio apenas cobria uma parte do perímetro do tubo. Assim, foram definidas posições do defeito relativamente à bobina sensível a ser utilizada, as quais são representadas na Figura 6.36. A azul claro encontra-se o defeito menor e a azul mais escuro o defeito intermédio.

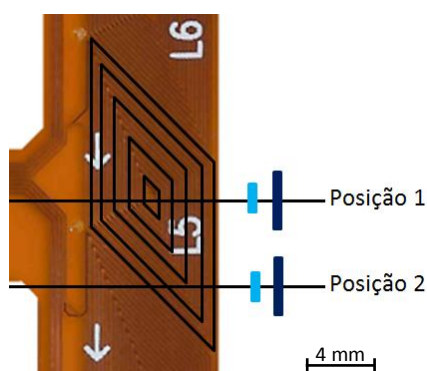


Figura 6.36 – Posições dos defeitos em relação às bobinas sensíveis.

6.8.1 – Resultados dos ensaios ao tubo do ITER

Na Figura 6.37 ilustra-se um varrimento ao tubo completo, por troços. Os troços devem-se a, como já foi referido, os defeitos estarem em locais diferentes do perímetro do tubo e a inspeção usar apenas uma bobina sensível de cada vez que apenas cobre 1/8 do perímetro neste caso. O varrimento foi realizado por ordem crescente em relação ao tamanho dos defeitos e como é possível observar, todos os defeitos estão claramente evidenciados no plano real.

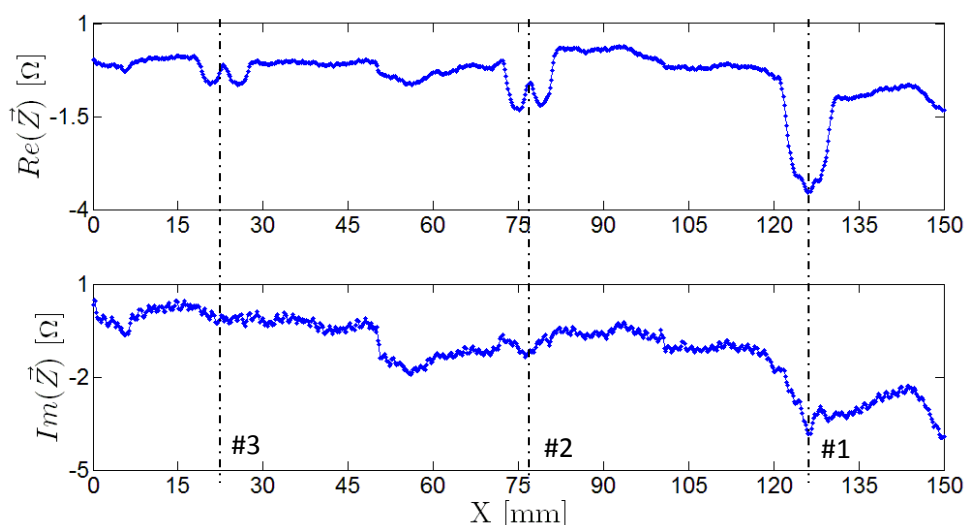


Figura 6.37 – Ensaio a 500 kHz na posição 1.

Na Figura 6.38 encontra-se o resultado obtido na inspeção ao defeito menor a 500 kHz, quando este passa pelo centro da bobina. O defeito é visível porém com pouca amplitude. O sinal obtido já não é o sinal característico de um sinal diferencial o que faz sentido. Sendo a excitação realizada pela própria bobina espiral trapezoidal, modo absoluto, criam-se as mesmas condições em ambas as metades da bobina obtendo um sinal absoluto igual em causa lado. Com a mesma frequência inspecionou-se o mesmo defeito usando a posição 2, que corresponde à posição equidistante ao centro de duas bobinas consecutivas; o defeito também foi detetado, o que demonstra a ausência de posições de sombra (ver Figura 6.39). Está também bem evidenciada uma assimetria no sinal obtido que corrobora a explicação para este sinal absoluto. O defeito passando apenas por uma extremidade da bobina significa que a bobina nesta posição não é divisível em metades iguais logo, o sinal será mais evidenciado num dos lados. De notar também que, o sinal obtido pelo defeito maior na Figura 6.37 é ligeiramente diferente sendo mais intenso no centro da bobina. Este comportamento deve estar relacionado com o fato de o defeito, devido ao seu comprimento superior, origine perturbações nas suas extremidades que os filamentos da bobina sensível inclinados a 45 graus na Figura 6.36 detetam, o que não acontece com defeitos mais pequenos pois não chegam a estar próximos o suficiente destes filamentos. No Anexo 14 encontram-se os restantes ensaios realizados com esta sonda.

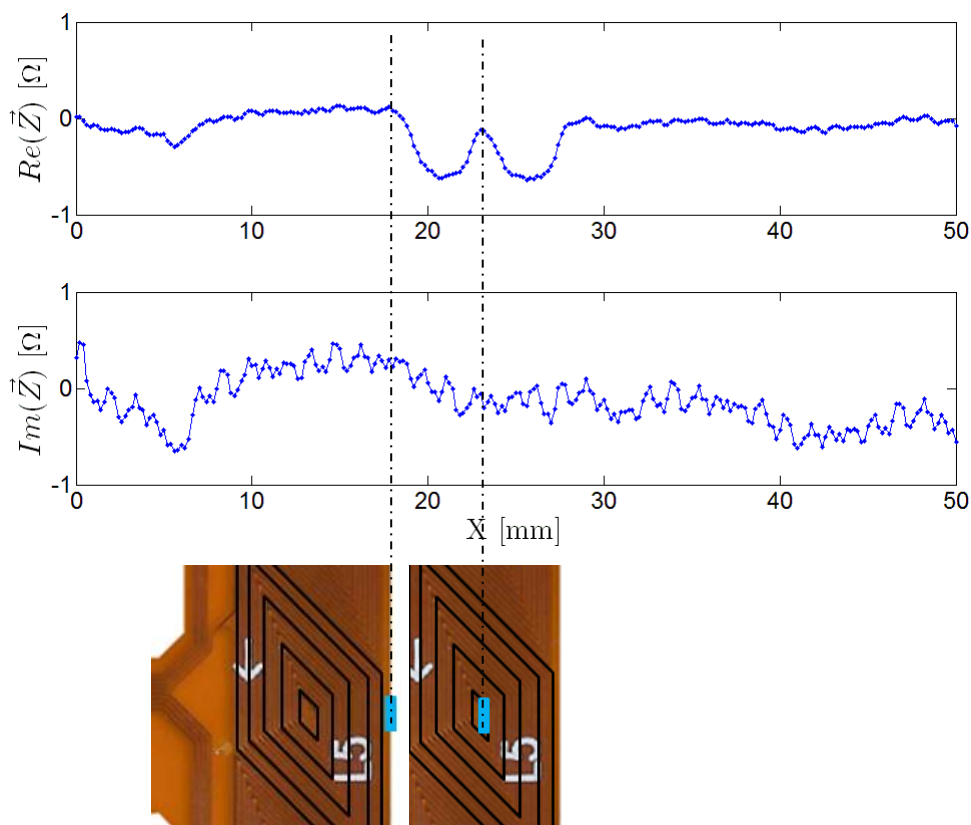


Figura 6.38 – Ensaio a 500 kHz na posição 1 ao defeito menor.

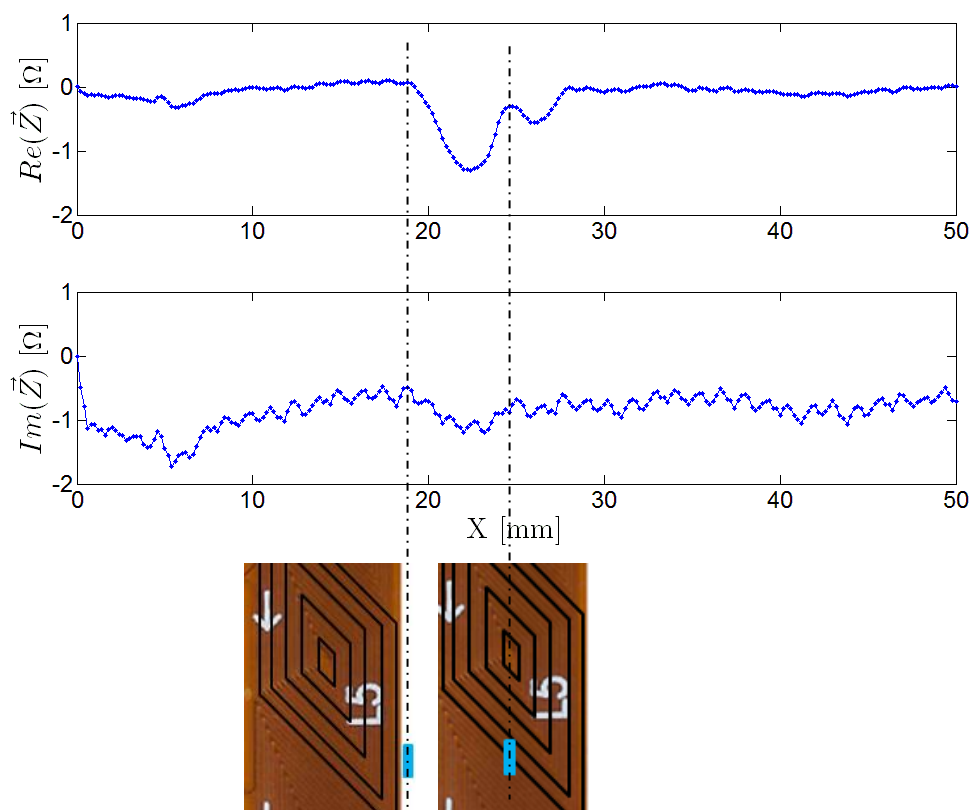


Figura 6.39 – Ensaio a 500 kHz na posição 2 ao defeito menor.

Na Figura 6.40 encontra-se o resultado obtido na inspeção ao defeito menor a 500 kHz, quando este passa pelo centro de uma bobina e a leitura é feita em diferencial com a bobina adjacente. O resultado obtido no modo absoluto desta configuração mostrou ser superior ao modo diferencial pois tem uma melhor relação sinal/ruído.

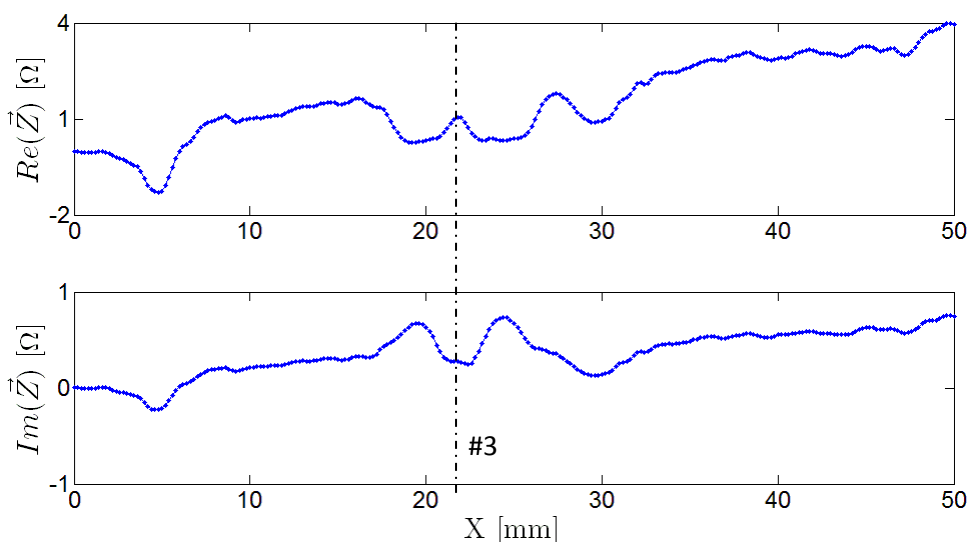


Figura 6.40 – Ensaio a 500 kHz ao defeito menor na posição 1 bobinas L4 e L5 em diferencial

Na Figura 6.41 encontra-se o resultado da simulação numérica para comparação com o resultado experimental. A simulação numérica revelou-se coerente face ao resultado obtido experimentalmente. De referir que os resultados estão apresentados em termos relativos.

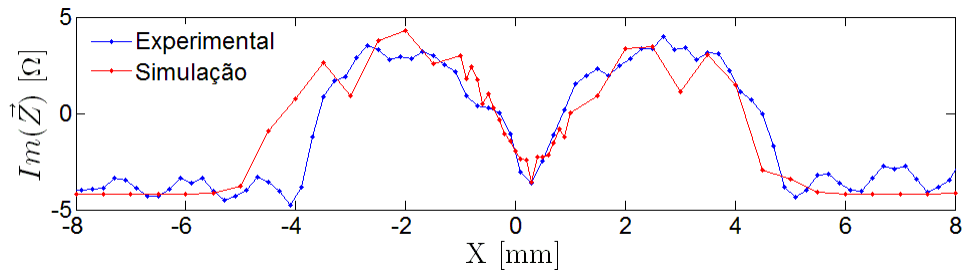


Figura 6.41 – Ensaio a 500 kHz na posição 1 ao defeito menor.

6.8.2 – Resultados dos ensaios ao tubo de aço ST 52

Na Figura 6.42 apresenta-se o resultado obtido ao inspecionar o tubo de aço ST 52. Como é possível observar, apenas o 1º defeito, relativo ao furo passante com 4mm de diâmetro, é detetado aos 20 mm.

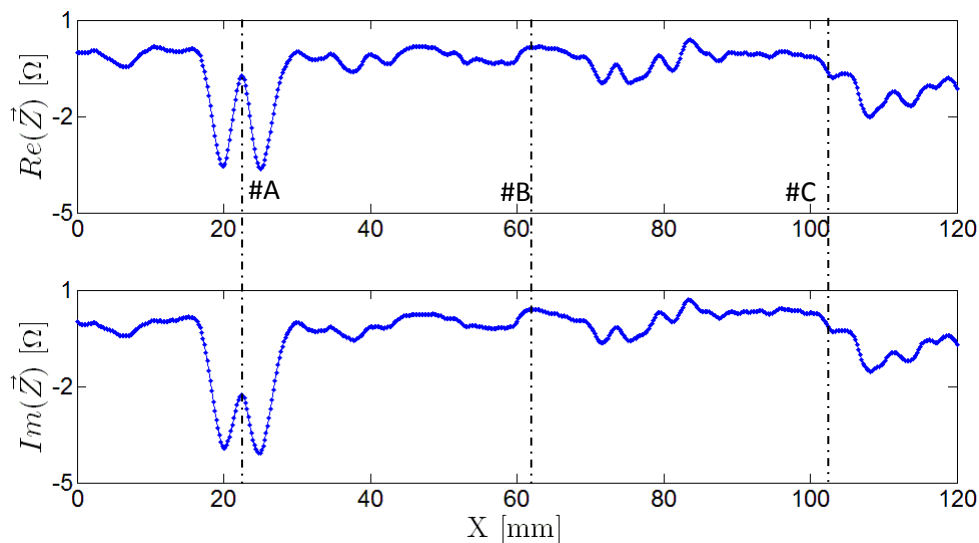


Figura 6.42 – Ensaio a 500 kHz na posição 1 com tubo de aço ST 52.

6.9 – Validação da Configuração 6 – Excitação e leitura com bobinas espirais circular

Nos ensaios efetuados com esta sonda foi também apenas usada uma bobina sensível ou duas em diferencial, pelo que cada ensaio apenas cobria uma parte do perímetro do tubo. Assim, foram definidas posições do defeito relativamente à bobina sensível a ser utilizada que se encontram representadas na Figura 6.43. A azul claro encontra-se o defeito menor e a azul mais escuro o defeito intermédio. As bobinas usadas foram a L3 e L5.

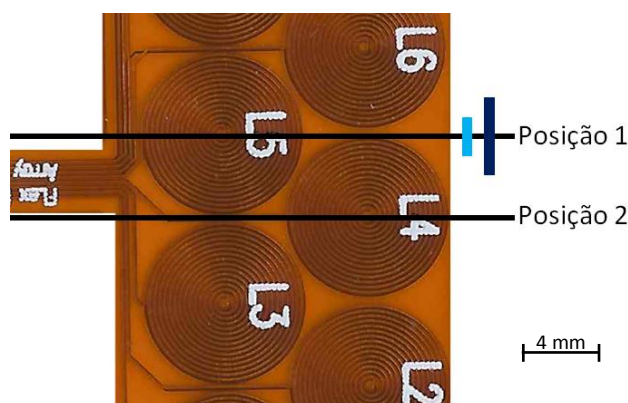


Figura 6.43 – Posições dos defeitos em relação às bobinas sensíveis.

6.9.1 – Resultados dos ensaios ao tubo do ITER

Na Figura 6.44 ilustra-se um varrimento do tubo por dois troços correspondentes à localização do defeito intermédio e o menor. Os troços devem-se a, como já foi referido, os defeitos estarem em locais diferentes do perímetro do tubo. O varrimento foi feito por ordem decrescente em relação ao tamanho dos defeitos.

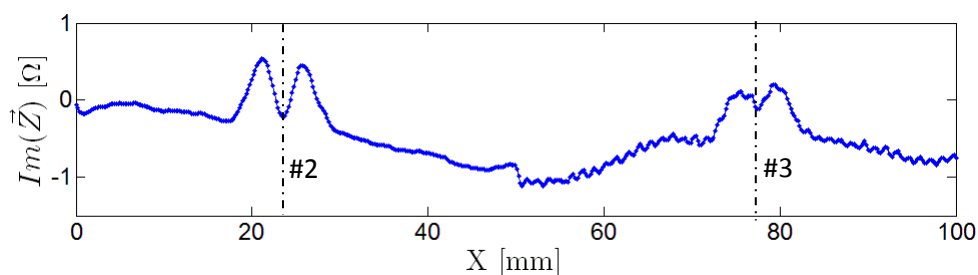


Figura 6.44 – Ensaio a 500 kHz aos defeitos #2 e #3 na posição 1.

Na Figura 6.45 encontra-se o resultado obtido na inspeção ao defeito menor a 2 MHz, quando este passa pelo centro da bobina L5, modo absoluto. O defeito é detetado mas com muito pouca amplitude e aspeto do sinal obtido é baseia-se no mesmo raciocínio da configuração anterior. Na Figura 6.46 é inspecionado o mesmo defeito usando a posição 2 que corresponde à posição equidistante entre duas bobinas. O defeito também é detetado embora com pouca amplitude. Na Figura 6.47 foram ligadas as bobinas L3 e L5 em diferencial, não se obtendo melhorias visíveis. Esta não se revelou uma configuração competitiva face às anterior. Estes resultados no entanto não deixam de ser importantes uma vez que esta configuração é muito próxima da sonda comercial DefHi da Eddyfi descrita no Capítulo 2 sendo a principal diferença o número de espiras no entanto, o conceito é o mesmo. No Anexo 15 encontram-se os restantes ensaios realizados com esta sonda.

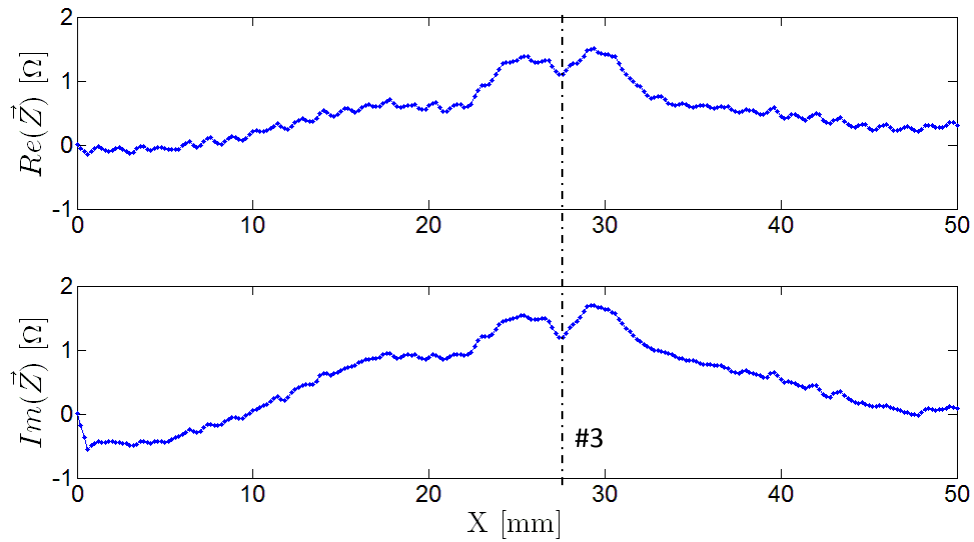


Figura 6.45 – Ensaio a 2 MHz com o defeito menor na posição 1.

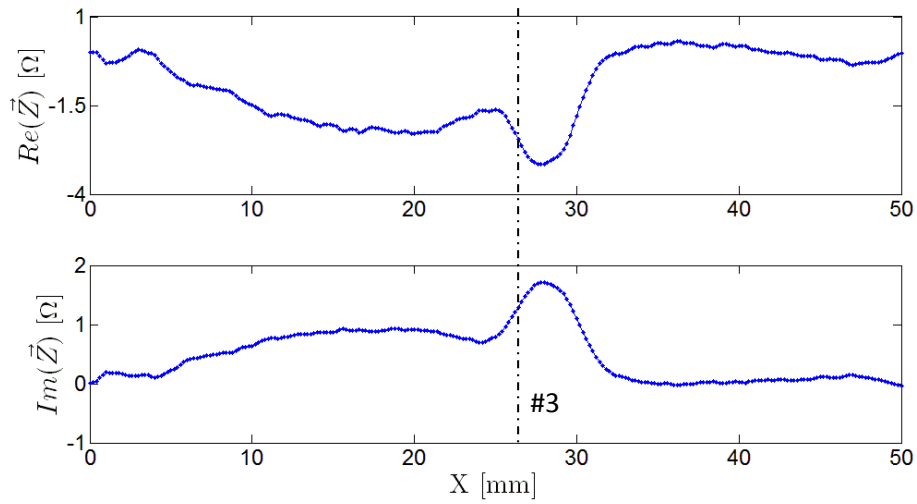


Figura 6.46 – Ensaio a 1 MHz com o defeito menor na posição 2.

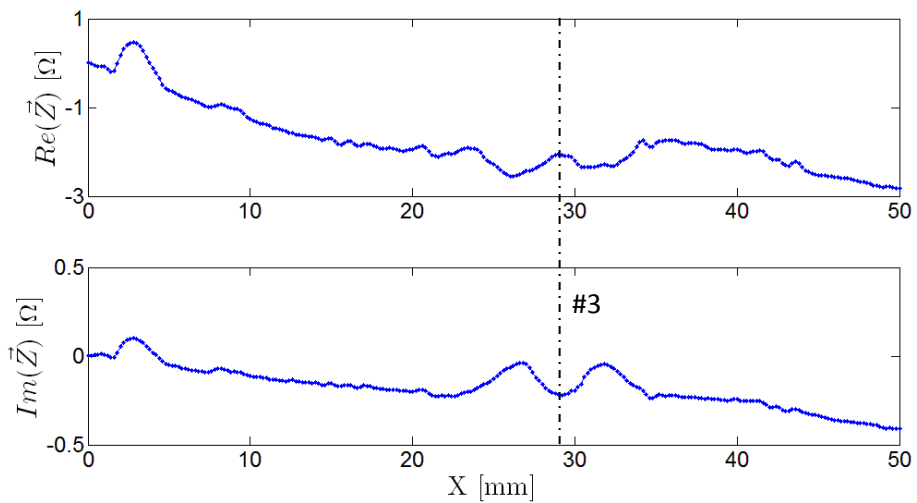


Figura 6.47 – Ensaio a 500 kHz ao defeito menor na posição 1 lendo L3 e L5 em diferencial.

6.9.2 – Resultados dos ensaios ao tubo de aço ST 52

Na Figura 6.48 apresenta-se o resultado obtido ao inspecionar o tubo de aço ST 52. Como é possível observar, apenas o 1º defeito, relativo ao furo passante com 4mm de diâmetro, é detetado aos 20 mm.

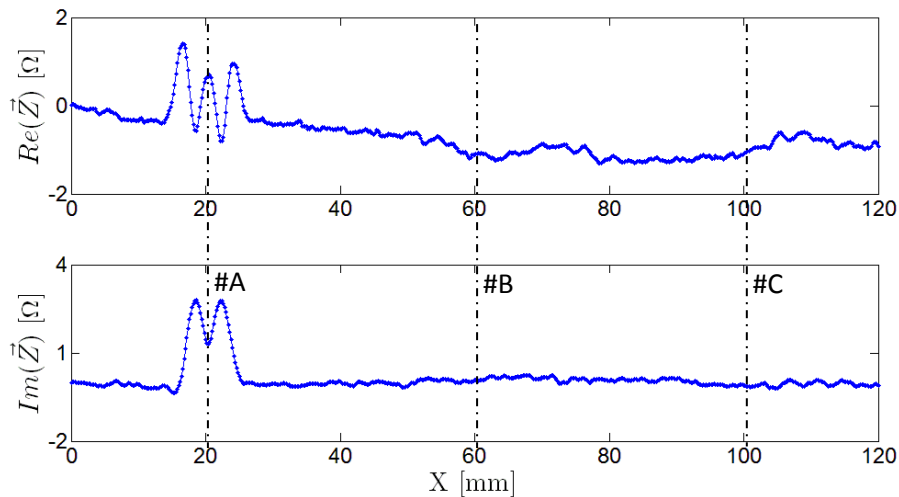


Figura 6.48 – Ensaio a 500 kHz na posição 1 ao tubo de aço ST 52.

6.10 – Validação da Configuração 7 – Excitação helicoidal com leitura em bobinas espirais trapezoidais planas

Nos ensaios efetuados com esta sonda foi também apenas usada uma bobina sensível ou duas em diferencial, pelo que cada ensaio apenas cobria uma parte do perímetro do tubo. Assim, foram definidas posições do defeito relativamente à bobina sensível a ser utilizada que se encontram representadas na Figura 6.36. A azul claro encontra-se o defeito menor na posição 2 e a azul mais escuro o defeito intermédio; a vermelho está representado o enrolamento de excitação. A sonda usada nos ensaios seguintes era constituída por 15 enrolamentos helicoidais, para a excitação, e bobinas espiral trapezoidais em substrato flexível vAx2x8 da Tabela 3.8 para a leitura.

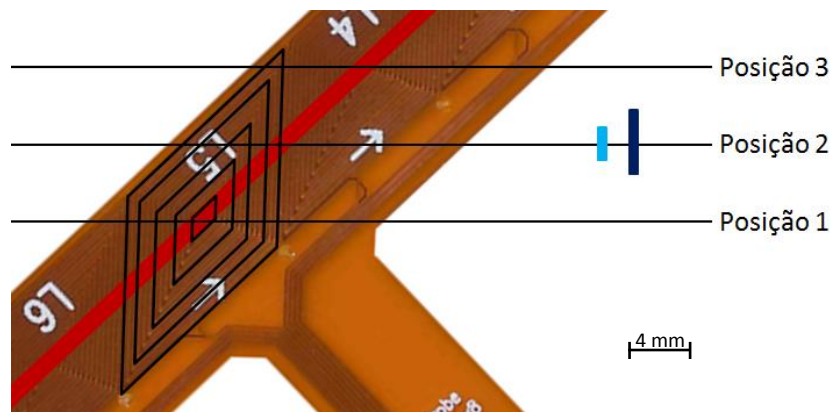


Figura 6.49 – Posições dos defeitos em relação às bobinas sensíveis.

6.10.1– Resultados dos ensaios ao tubo do ITER

Na Figura 6.50 ilustra-se um varrimento ao tubo completo por troços. Os troços devem-se a, como já foi referido, os defeitos estarem em locais diferentes do perímetro do tubo e a inspeção usar apenas uma bobina sensível de cada vez que cobre apenas 1/8 do perímetro. O varrimento foi feito por ordem decrescente em relação ao tamanho dos defeitos apesar de o primeiro defeito não ter o sinal com maior amplitude. Tal deve-se à saída de grande parte da sonda do interior do tubo fazendo assim variar o *lift-off*, ao qual se acrescenta também o efeito de bordo. Apesar do pormenor explicado do defeito maior, este é um dos melhores resultados obtidos, é possível uma identificação muito clara de todos os defeitos e obteve-se uma relação sinal/ruído excelente.

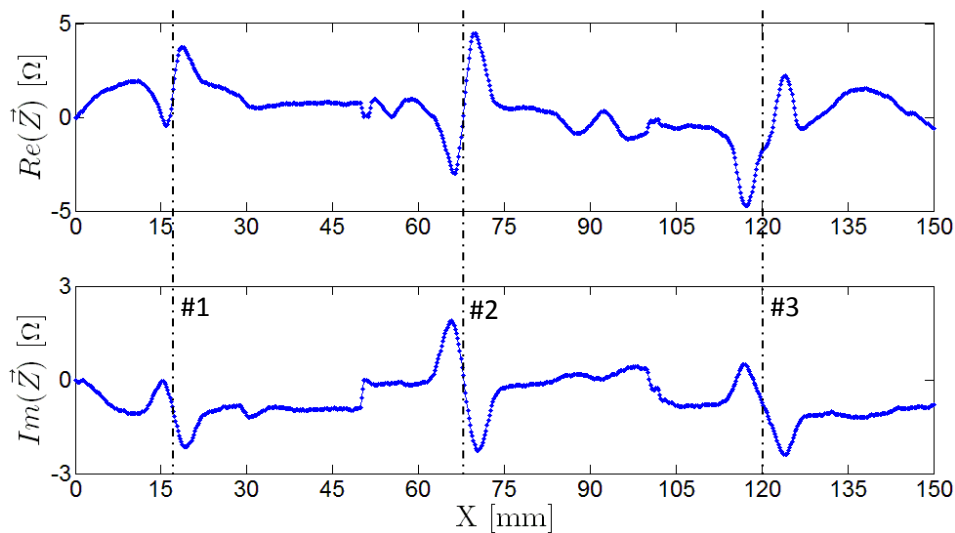


Figura 6.50 – Ensaio a 500 kHz na posição 1.

Na Figura 6.51 encontra-se o resultado da simulação numérica para comparação com o resultado experimental. A simulação numérica revelou-se mais uma vez coerente face ao resultado obtido experimentalmente. De referir que os resultados estão apresentados em termos relativos.

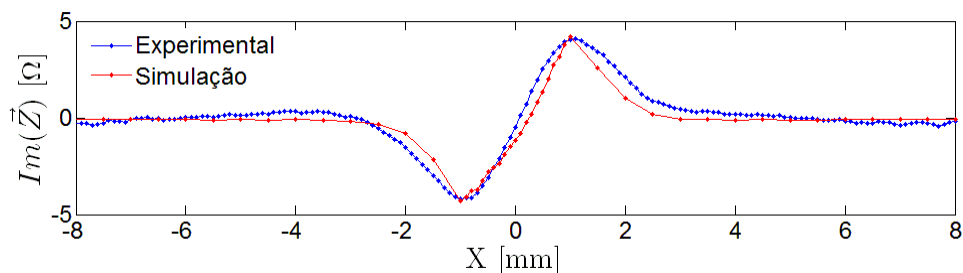


Figura 6.51 – Ensaio a 500 kHz ao defeito menor na posição 1.

Na Figura 6.52 encontra-se o resultado obtido na inspeção ao defeito menor, quando este passa pelo centro da bobina sensível L5. Como é possível visualizar, o defeito está muito bem evidenciado. Na Figura 6.53, estão ilustrados os resultados de três ensaios a 500 kHz, cada um numa posição diferente de acordo com a Figura 6.49.

O defeito foi detetado em todas as posições apesar de se apresentar muito subtilmente na posição 3 no plano imaginário. No entanto, a bobina seguinte, L4, irá detetar o defeito nessa posição pois já passa pelo seu centro. A subida elevada perto do fim do ensaio, nomeadamente na parte real da posição 1 e 2 deve-se à soldadura presente no tubo. Sendo esta sonda um pouco mais comprida, devido à excitação helicoidal diagonal, quando a bobina sensível ainda estava afastada da soldadura, uma extremidade da bobina de excitação já estava demasiadamente perto. No Anexo 16 encontram-se os restantes ensaios realizados com esta sonda.

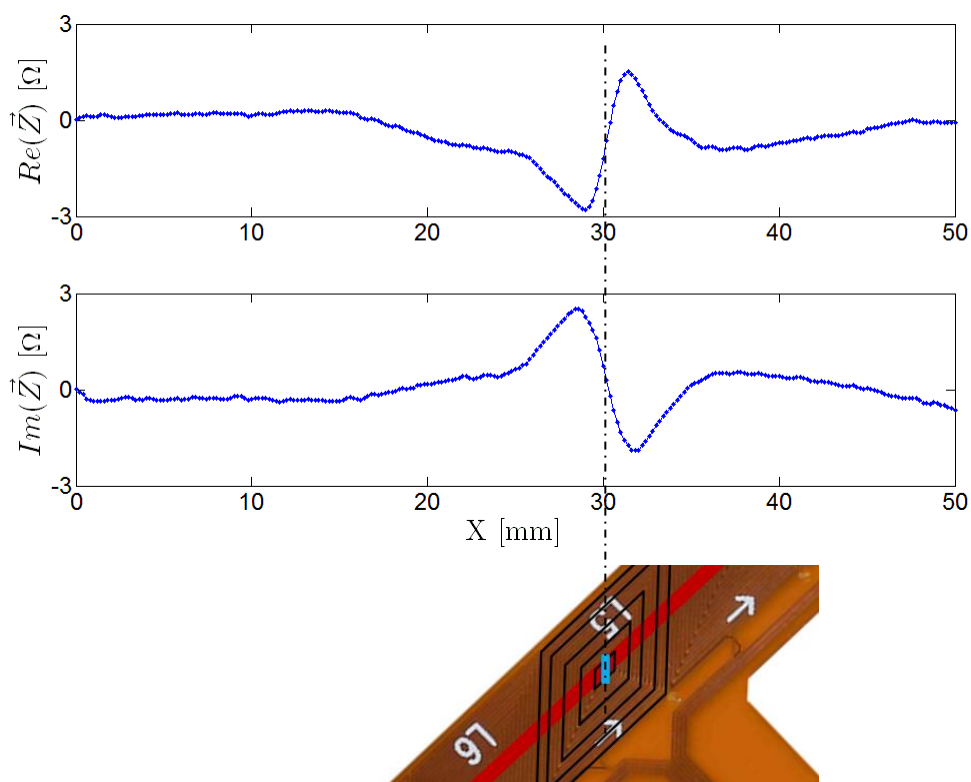


Figura 6.52 – Ensaio a 750 kHz ao defeito menor na posição 1.

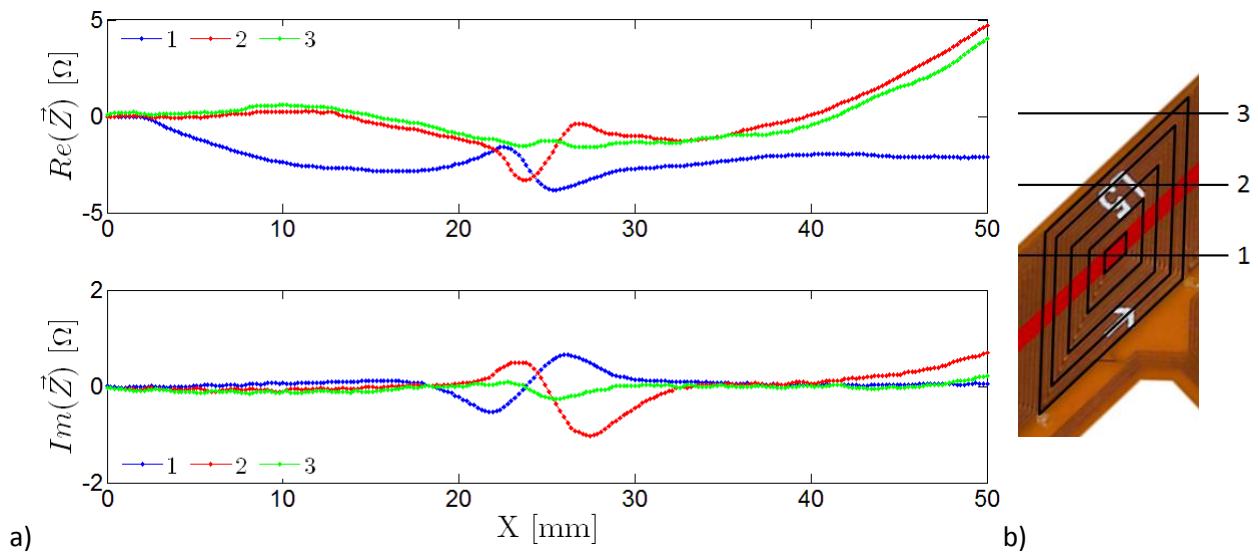


Figura 6.53 – a) Ensaio a 500 kHz ao defeito menor com diferentes posições b) Posições.

6.10.2– Resultados dos ensaios ao tubo de aço ST 52

Na Figura 6.54 apresenta-se o resultado obtido ao inspecionar o tubo de aço ST 52. Como é possível observar, apenas o 1º defeito, relativo ao furo passante com 4mm de diâmetro, é detetado aos 20 mm.

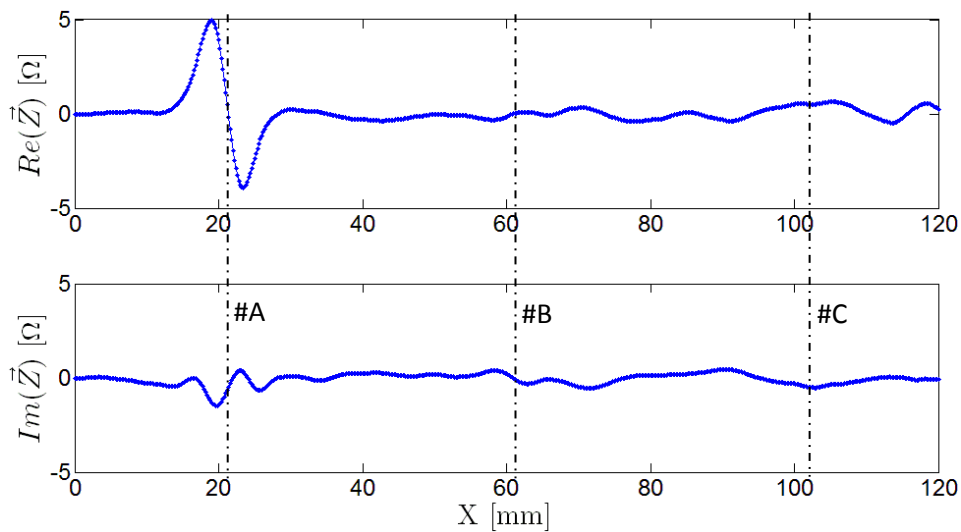


Figura 6.54 – Ensaio a 500 kHz na posição 1 com o tubo de aço ST 52.

6.11 – Síntese do Capítulo

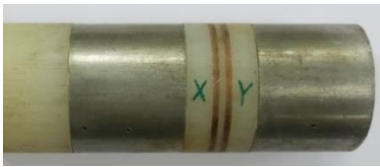
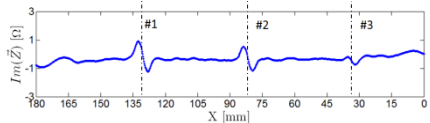

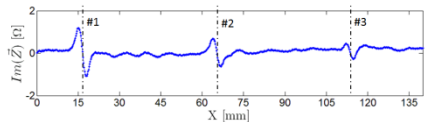

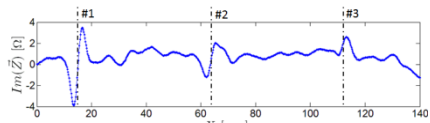

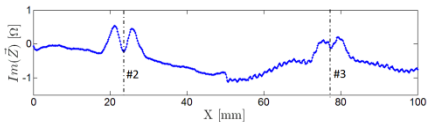

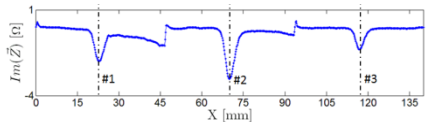

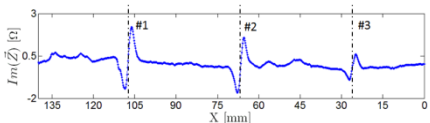

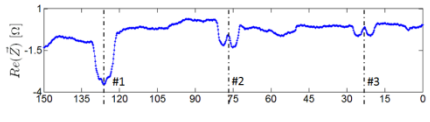

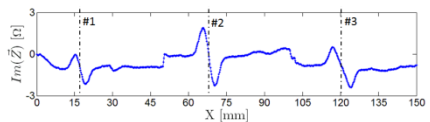
Neste capítulo foram apresentados os principais resultados da aplicação e da validação das sondas de CI, a dois tubos de materiais diferentes, efetuados com o auxílio dos dispositivos de locomoção e posicionamento de sondas desenvolvidos no âmbito deste trabalho.

Os ensaios com as sondas produzidas revelaram eficácia na detecção dos três defeitos do tubo do ITER. Foram obtidos os melhores resultados nas sondas com excitação independente e leitura com as bobinas em substrato flexível (modo de reflexão) com geometria espiral trapezoidal como é o caso das configurações 3, 4 e 7. Estas são as sondas inovadoras desenvolvidas no âmbito do trabalho. Sendo a principal diferença entre estas sondas a direção da excitação, é particularmente interessante constatar a capacidade de detecção dos defeitos pela configuração 4 cuja excitação tem a mesma orientação dos defeitos presentes no tubo. Note-se que, a detecção de defeitos com a mesma orientação das correntes induzidas é o caso extremo. A configuração 3, com a excitação axial, provou ser uma das melhores soluções para esta orientação de defeito. No entanto, apresenta um inconveniente relativo à presença de posições de sombra. Este problema pode ser ultrapassado aplicando uma ligeira inclinação no enrolamento de excitação; sabendo que os defeitos mais comuns são, tangenciais, axiais e a 45°, esta sonda dificilmente teria a excitação na mesma orientação do defeito. A configuração 7 com a excitação helicoidal obteve a melhor relação sinal/ruído de todas as sondas testadas ficando as configurações 1, 2 e 6, que são réplicas de sondas já existentes no mercado, muito aquém.

Os ensaios no tubo de aço ST 52 demonstraram a capacidade dos conceitos 3 a 7 na detecção de defeitos com diferentes tamanhos. No entanto, esta capacidade limita-se a defeitos superficiais. Os dois furos não passantes não foram detetados por nenhuma das configurações. Uma razão pode derivar do fato de estar camuflado no meio do ruído causado pelas várias irregularidades originadas pela maquinação do tubo. As configurações 1, 2 e a sonda comercial que consistiam em enrolamentos tangenciais não detetaram qualquer defeito neste tubo; são relativamente eficazes na detecção de defeitos pequenos (até 4 mm de comprimento), mas não de defeitos já consideráveis (2 - 4 mm de diâmetro).

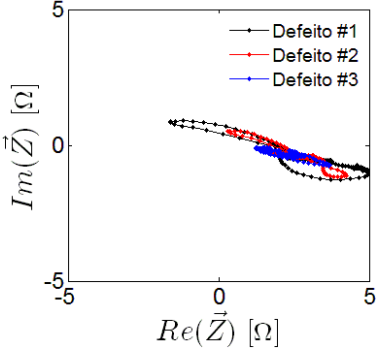
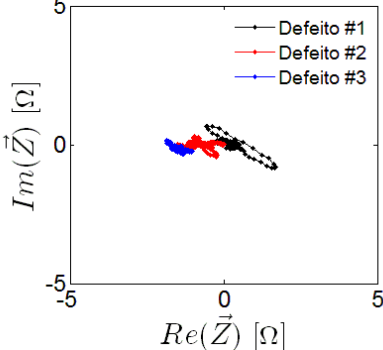
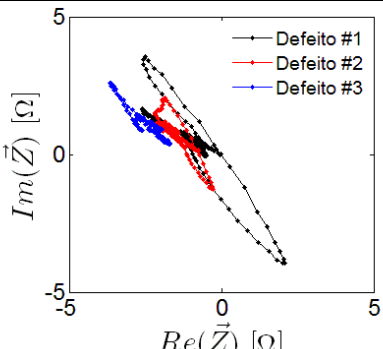
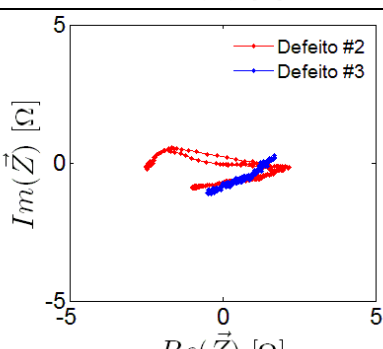
Concluindo, as configurações com leitura nas bobinas espiral trapezoidais e excitação independente, modo reflexão, obtiveram resultados francamente melhores do que a sonda comercial assim como as três sondas replicadas de configurações já existentes. Além da sua capacidade de detecção do defeito mais pequeno do tubo do ITER, que era o objetivo proposto, estas sondas possibilitam, com o equipamento indicado, a leitura individual de cada bobina sensível permitindo conhecer a localização circunferencial do defeito. Na Tabela 6.4 encontra-se um resumo das configurações com respetivos resultados e comentários.

Tabela 6.4 – Comparação das diferentes configurações.

	Configuração	Comentários	Resultados
		Defeito menor difícilmente perceptível	
Sondas já existentes, replicadas para efeitos de comparação	1 	Resultado ligeiramente melhor que a sonda comercial	
	2 	Amplitude do sinal maior mas sinal desequilibrado	
	6 	Defeitos bem visíveis mas com fraca relação sinal/ruído	
Sondas inovadoras desenvolvidas no âmbito do presente trabalho	3 	Defeitos muito bem definidos com boa relação sinal/ruído	
	4 	Defeitos muito bem definidos com boa relação sinal/ruído	
	5 	Defeitos bem definidos com fraca relação sinal/ruído	
	7 	Defeitos muito bem definidos com excelente relação sinal/ruído	

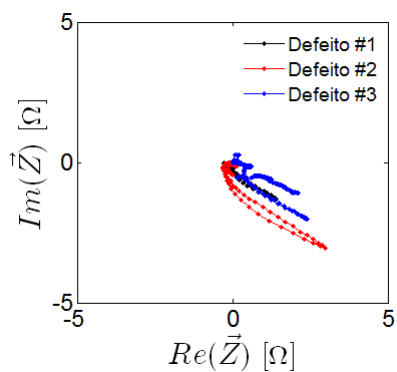
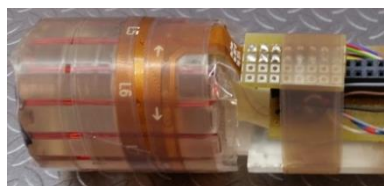
Os ensaios realizados foram todos apresentados representando a parte real e a parte imaginária da impedância, em separado, ao longo da distância percorrida pois permite uma facilidade acrescida na análise e compreensão dos resultados. No entanto, na indústria os equipamentos de inspeção apresentam o resultado no plano de impedâncias para uma análise rápida. Neste sentido, é interessante apresentar os melhores resultados, no plano de impedância, de cada sonda testada (Tabela 6.5).

Tabela 6.5 – Diferentes configurações com resultados apresentados no plano de impedâncias.

Configuração		Resultados	Frequência
Sondas já existentes, réplicas para efeitos de comparação	Sonda comercial		200 kHz
	1		300 kHz
	2		500 kHz
	6		500 kHz

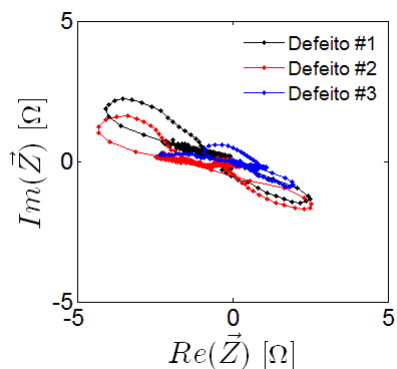
Sondas inovadoras desenvolvidas no âmbito do presente trabalho

3



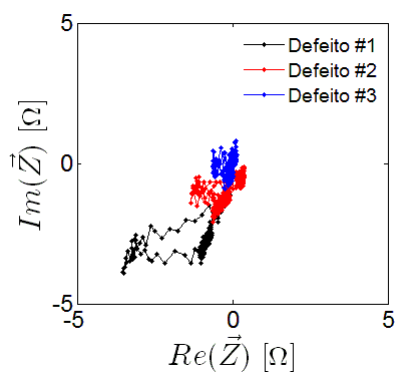
500 kHz

4



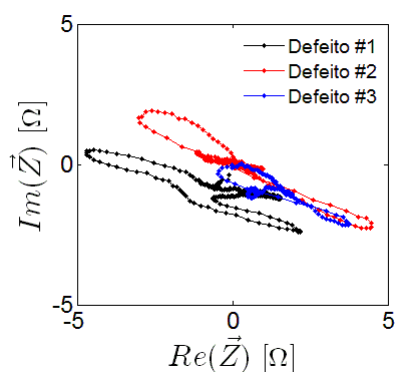
500 kHz

5



500 kHz

7



500 kHz

7 – CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.1 – Introdução

As conclusões relativas ao trabalho realizado e as propostas para desenvolvimentos futuros são apresentadas neste capítulo. As conclusões mais importantes do trabalho estão já implícitas nos comentários aos resultados obtidos, e sintetizadas no final de cada capítulo. Assim, neste capítulo pretende-se apenas evidenciar e consolidar as conclusões de carácter mais abrangente.

7.2 – Conclusões

O estado da arte mostrou que a inspeção de geometrias tubulares é em grande parte efetuada com recurso a sondas convencionais constituídas apenas por enrolamentos tangenciais. A investigação realizada concluiu que este tipo de sondas, não é o ideal para defeitos orientados tangencialmente. Para esse tipo de defeitos existem algumas técnicas e configurações que foram exploradas, tendo-se constatado que não existe uma solução ideal única, para qualquer orientação de defeito.

No curso deste trabalho foram pensadas várias configurações, tendo sido adotadas sete. Para perceber que tipo de comportamento seria de esperar das configurações ponderadas foram realizadas 28 simulações com os diferentes conceitos e variando alguns parâmetros. Os resultados obtidos foram encorajadores e permitiram avançar para o fabrico das sondas para realizar inspeções. As sondas fabricadas ficaram muito perto do conceito inicial de cada uma.

Para a realização dos ensaios experimentais foi construído um equipamento que permitisse a locomoção da sonda no interior dos componentes a ensaiar com um elevado grau de precisão. Este equipamento integra uma mesa móvel com capacidade de suportar e armazenar o material e equipamento necessário à realização dos ensaios que se revelou muito adequado à realização dos ensaios.

Todas as sondas foram testadas no tubo do ITER com diferentes parâmetros de frequência, ganho e posição das bobinas face aos defeitos conhecidos no seu interior. Foram também realizados ensaios num tubo de aço ST 52, com defeitos padrão produzidos, para efeitos de comparação. No total foram realizados cerca de 200 ensaios experimentais.

Das configurações produzidas, três foram réplicas de sondas já existentes. Estas obtiveram resultados com melhor relação sinal/ruído que a sonda comercial. Os defeitos presentes no tubo do ITER foram todos detetados no entanto, a qualidade do sinal do defeito mais pequeno não era a ideal. Estas configurações não foram capazes de detetar quaisquer defeitos do tubo em aço ST 52.

As sondas inovadoras desenvolvidas no âmbito do presente trabalho constituídas por bobinas sensíveis espirais trapezoidais planas e enrolamentos para a excitação, sondas de reflexão, obtiveram resultados de muito boa qualidade. O defeito mais pequeno presente no tubo do ITER foi detetado com uma relação sinal/ruído excelente não permitindo a existência de quaisquer dúvidas da sua existência. A sétima configuração, cuja excitação era helicoidal

espiral conduziu à obtenção do sinal mais claro e mais bem definido do defeito mais pequeno. Estas sondas foram também as únicas sondas que detetaram um dos defeitos do tubo de aço ST52.

Os resultados obtidos dos ensaios experimentais foram coerentes com as simulações efetuadas provando assim a sua utilidade e importância pois permitiram avaliar e prever os efeitos dos diferentes parâmetros e caracterizar os fenómenos elétricos e magnéticos envolvidos no funcionamento das sondas.

Este trabalho permitiu selecionar as melhores configurações de sondas de CI que permitem satisfazer os objetivos propostos. As abordagens inovadoras desenvolvidas, nomeadamente a configuração 7, demonstraram uma capacidade de deteção do defeito mais pequeno do tubo do ITER com um sinal extremamente bem definido com uma relação sinal/ruído muito boa. Este defeito inspecionado com a sonda comercial em condições idênticas de inspeção gera um sinal de pequena amplitude que pode facilmente passar despercebido, não sendo conhecido *a priori* a presença do defeito do tubo.

7.3 – Propostas para Desenvolvimentos Futuros

Para desenvolvimentos futuros seria interessante alargar o estudo a outros materiais condutores, que não foram examinados neste trabalho, nomeadamente titânio, Inconel, alumínio, etc.

Também seria interessante investigar outros tipos de defeitos, com dimensões, geometria e/ou orientações diferentes. A localização do defeito em relação à superfície (defeitos sub-superficiais) será outra possibilidade a considerar.

A otimização das bobinas usadas nas sondas também pode ser objeto de desenvolvimento: testar outras geometrias variando, por exemplo, o ângulo do trapézio, a largura do cobre dos enrolamentos, o espaçamento dos enrolamentos, o número de enrolamentos, a espessura do cobre, etc. Outras disposições dos enrolamentos de excitação também deverão ser experimentadas.

Por fim, embora não seja crítico em ambiente laboratorial, seria interessante usar um *hardware* capaz de suportar multiplexagem, permitindo a leitura de todas as bobinas sensíveis, em torno da sonda, em simultâneo como aconteceria numa situação real de inspeção em larga escala.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ITER, [Online]. Disponível em: <http://www.iter.org/>. [Acedido em 21 01 2014].
- [2] “Fusion Energy,” NFRI - National Fusion Reserch Institute, [Online]. Disponível em: <https://www.nfri.re.kr/english/fusion/iter.php>. [Acedido em 21 01 2014].
- [3] Brown Mcfarlane, [Online]. Disponível em: <http://www.brownmac.com/products/stainless-steel-plate/Stainless-Steel-304-and-304l-portuguese.aspx>. [Acedido em 22 01 2014].
- [4] Borges, J., “Desenvolvimento de Técnicas Baseadas em Filmes de Células Bacterianas para Aplicação em Ensaaios Não Destrutivos,” FCT, Dissertação de Mestrado, Lisboa, 2011.
- [5] R. Prakash, Non-Destructive Testing Techniques, New Age Science, 2009.
- [6] Bernardo, G., “Técnicas avançadas de controlo não destrutivo para ligações de ligas com memória de forma a aços de construção civil,” FCT, Dissertação de Mestrado, Lisboa, 2012.
- [7] Paul E. Mix, INTRODUCTION TO NONDESTRUCTIVE TESTING, John Wiley & Sons, 2005.
- [8] Santos, T., “END,” *Apontamentos das aulas de PAFEND*, 2013.
- [9] Paul A. Tipler, em *Física - 2º Volume: Electricidade e Magnetismo, Óptica*, LTC Editora, 2000, p. 207.
- [10] J. Bird, Electrical Circuit Theory and Technology, Oxford: Newnes, 2003.
- [11] Gonzalez, J., “Desenvolvimento e Aplicação de Sondas Inovadoras de Correntes Induzidas Para Ensaaios Não Destrutivos,” FCT, Lisboa, 2011.
- [12] NDT Resource Center, “History of Eddy Current Testing,” [Online]. Disponível em: <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/Introduction/historyofET.htm>. [Acedido em 19 01 2014].
- [13] Victor Aviation, “Eddy Current Electromagnetic Induction,” [Online]. Disponível em: http://www.victor-aviation.com/Eddy_Current_Inspection.php. [Acedido em 19 01 2014].
- [14] American Society for Non-destructive Testing – ASNT, [Online]. Disponível em: <http://www.icndt.org>. [Acedido em 19 01 2014].
- [15] F. P. Almeida, J. Barata, P. Barros, Ensaaios não destrutivos, Lisboa: Edições técnicas do Instituto de Soldadura e Qualidade, 1992.

- [16] L. Rosado, T. Santos, M. Piedade, P. Ramos e P. Vilaça, "New Non Destructive Test technique on Metal Inspection," *IMEKO 2009 - Fundamental and Applied Metrology*, vol. 09, pp. 443-448, 2009.
- [17] Li Shu, Huang Songling, Zhao Wei, Yu Peng, "Study of pulse eddy current Probes detecting cracks extending in all directions," *Sensors and Actuators A*, vol. 141, pp. 13-19, 2008.
- [18] G. Almeida, "Simulação Numérica e Avaliação Experimental do Desempenho de Sondas Inovadoras de Correntes Induzidas em Diferentes Materiais e Defeitos," FCT, Dissertação de Mestrado, Lisboa, 2012.
- [19] Olympus, "Olympus corporation," [Online]. Disponível em: <http://www.olympus-ims.com/pt/>. [Acedido em 06 06 2014].
- [20] NDT Resource Center, "Tube Inspection," [Online]. Disponível em: <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/Applications/tubeinspection.htm>. [Acedido em 18 01 2014].
- [21] Birring AS., "Selection of NDT techniques for inspection of heat exchanger tubing," em *ASNT International Conference on Petroleum Industry Inspection*, Houston, 1999.
- [22] Sullivan, S.P.; Smith, S.P.; Sharp, F.L., "Simultaneous absolute and differential operation of eddy current bobbin probes for heat exchanger tube inspection," *Materials Evaluation*, vol. 58, n.º 5, pp. 634-8, 2000.
- [23] P.-Y. Joubert, Y. Le Bihan, D. Placko, "Localization of defects in steam generator tubes using a multi-coil eddy current probe dedicated to high speed inspection," *NDT&E International*, vol. 35, pp. 53-59, 2002.
- [24] Innospection, "Multiple Frequency Eddy Current," [Online]. Disponível em: <http://www.innospection.com/pdfs/Multiple%20Frequency%20Eddy%20Current.pdf>. [Acedido em 16 01 2014].
- [25] Kim, Young Joo ; Ahn, Bong Young ; Kim, Ki Bok ; Kim, Young Gil, "Multi-Coil Eddy Current Probe for the Detection of Circumferential Cracks in Tubing," *Key Engineering Materials*, pp. 505-508, 2006.
- [26] Young-Joo Kim n, Seung-SeokLee, "Eddy current probes of inclined coils for increased detectability of circumferential cracks in tubing," *NDT&E International*, vol. 49, pp. 77-82, 2012.
- [27] Patente de Invenção Nacional PT Nº 103854, New NDT eddy current Probe, Inventores: Telmo Santos e Pedro Vilaça, 2007.
- [28] T. Santos, "Ensaio Não Destrutivo por Correntes Induzidas: Desenvolvimento e Aplicação à Soldadura por Fricção Linear," IST, Tese de Doutoramento, Lisboa, 2009.

- [29] J.L. Fisher, "Remote-Field Eddy Current Inspection," em *Nondestructive Evaluation and Quality Control*, 1992, pp. 407-411.
- [30] T.R. Schmidt, "The Remote-Field Eddy Current Inspection Technique," *Mater. Eval.*, vol. 42, 1984.
- [31] Innospection, "Remote Field Eddy Current Technique," [Online]. Disponível em: <http://www.innospection.com/pdfs/Remote%20Field%20Eddy%20Current.pdf>. [Acedido em 18 01 2014].
- [32] Binfeng Yang, Xuechao Li, "Pulsed remote field technique used for nondestructive inspection of ferromagnetic tube," *NDT&E International*, vol. 53, pp. 47-52, 2013.
- [33] Smith RA, Hugo GR, "Transient eddy current NDE for ageing aircraft - capabilities and limitations," *Insight*, vol. 40, pp. 14-25, 2001.
- [34] Yang BF, Luo FL, Han D., "Research on edge identification of a defect using pulsed eddy current based on principal component analysis," *NDT&E International*, vol. 40, pp. 294-299, 2007.
- [35] Yang BF, Luo FL, Han D, "Pulsed eddy current technique used for nondestructive inspection of aging aircraft," *Insight*, vol. 48, pp. 411-414, 2006.
- [36] Sophian A, Tian GY, Taylor D, "A feature extraction technique based on principal component analysis for pulsed eddy current NDT," *NDT&E International*, vol. 36, pp. 37-41, 2003.
- [37] Vasic D, Bilas V, Ambrus D, "Pulsed eddy current nondestructive testing of ferromagnetic tubes," em *IMTC 2003 instrumentation and measurement technology conference*, 2003.
- [38] Junjun Xin, Naiguang Lei, Lalita Udpa, Satish S.Udpa, "Rotating field eddy current probe with bobbin pickup coil for steam generator tubes inspection," *NDT&E International*, vol. 54, pp. 45-55, 2013.
- [39] Eddyfi, "Eddyfi," Eddyfi, [Online]. Disponível em: <http://www.eddyfi.com>. [Acedido em 05 09 2014].
- [40] Dupont, [Online]. Disponível em: <http://www.dupont.com>. [Acedido em 7 2014].
- [41] Altium, "Altium Designer 14," [Online]. Disponível em: <http://www.altium.com/>.
- [42] HIOKI, [Online]. Disponível em: http://www.hioki.com/products/lcr_resistance_signal/lcr_resistance_meters/539. [Acedido em 5 2 2014].
- [43] CAST Computer Simulation Technology AG, [Online]. Disponível em: <https://www.cst.com/>. [Acedido em Fevereiro 2014].
- [44] F. David Doty, Jatin Kulkarni, Christopher Turner, George Entzminger, Anthony Bielecki, "Using a cross-coil to reduce RF heating by an order of magnitude in triple-resonance multinuclear MAS at

- high fields," *Journal of Magnetic Resonance*, vol. 182, pp. 239-253, 2006.
- [45] Makprofile, [Online]. Disponível em: <http://www.makprofile.com>. [Acedido em 19 05 2014].
- [46] IguS, [Online]. Disponível em: <http://www.igus.pt>. [Acedido em 4 2014].
- [47] Zetec, [Online]. Disponível em: <http://www.zetec.com/>. [Acedido em 5 2 2014].

ANEXOS

Anexo 1 – Exemplo de macro da simulação do conceito 3

' Configuração 3	
Sub Main ()	
Dim driver_y1 As Single	
Dim driver_y2 As Single	
Dim driver_y3 As Single	
Dim h34 As Single	
Dim h12 As Single	
Dim h1 As Single	
Dim W As Single	
Dim h2 As Single	
Dim h3 As Single	
Dim h4 As Single	
Dim x1 As Single	
Dim x2 As Single	
Dim x3 As Single	
Dim x4 As Single	
Dim x5 As Single	
Dim x6 As Single	
Dim x7 As Single	
Dim x8 As Single	
Dim x9 As Single	
Dim x10 As Single	
Dim y1 As Single	
Dim y2 As Single	
Dim y3 As Single	
Dim y4 As Single	
Dim y5 As Single	
Dim y6 As Single	
Dim y7 As Single	
Dim y8 As Single	
Dim y9 As Single	
Dim y10 As Single	
Dim c100 As Single	
Dim h100 As Single	
Dim c99 As Single	
Dim h99 As Single	
Dim i As Integer	
Dim move_y As Single	
Dim move_x As Single	
Dim line_name1 As String	
Dim line_name2 As String	
Dim line_name3 As String	
Dim line_name4 As String	
Dim line_name5 As String	
Dim line_name6 As String	
Dim line_name7 As String	
Dim line_name8 As String	
Dim line_name9 As String	
	With Line
	.Reset : .Name
	"line3_1" : .Curve "drv3" : .X1 xi/2 : .Y1 0 : .X2
	xi/2 : .Y2 -yi : .Create
	End With
	With Line
	.Reset : .Name
	"line3_2" : .Curve "drv3" : .X1 xi/2 : .Y1 -
	yi : .X2 -xi/2 : .Y2 -yi+h12 : .Create
	End With
	With Line
	.Reset : .Name
	"line3_3" : .Curve "drv3" : .X1 -xi/2 : .Y1 -
	yi+h12 : .X2 -xi/2 : .Y2 (2*yi-(yi-h12)): .Create
	End With
	With Line
	.Reset : .Name
	"line3_4" : .Curve "drv3" : .X1 -xi/2 : .Y1 (2*yi-
	(yi-h12)) : .X2 xi/2+2*coils_profile : .Y2 (2*yi-
	(yi-h12)-h34): .Create
	End With
	x1 = xi/2
	y1 = (2*yi-(yi-h12)-h34)-h1
	x2 = xi/2
	y2 = -yi
	x3=-xi/2
	y3=-yi+h12
	x4=-xi/2
	y4=(2*yi-(yi-h12))
	x5 = xi/2+ 2*coils_profile
	y5 = (2*yi-(yi-h12)-h34)
	For i = 1 To voltas-1
	x1 = x1 + 2*coils_profile
	y1 = y1 + h1
	x2 = x2 + 2*coils_profile
	y2 = y2 - h2
	x3 = x3 - 2*coils_profile
	y3 = y3 - h3
	x4 = x4 - 2*coils_profile
	y4 = y4 + h4
	x5 = x5 + 2*coils_profile
	y5 = y5 + h1
	line_name1 = "line3_" &
	4*i+986
	With Line
	.Reset : .Name
	line_name1 : .Curve "drv3" : .X1 x1 : .Y1
	y1 : .X2 x2 : .Y2 y2 : .Create
	End With

With LFSolver .ResetFrequencySettings .AddFrequency "freq" End With With Units .Geometry "mm" .Frequency "kHz" .Time "s" .TemperatureUnit "Kelvin" .Voltage "V" .Current "A" .Resistance "Ohm" .Conductance "S" .Capacitance "PikoF" .Inductance "NanoH" End With With Material .Reset .Name "mat_caracteristics" .FrqType "static" .Type "Normal" .SetMaterialUnit "Hz", "mm" .Epsilon "1" .Mue "1.0" .Kappa "3.56e+007" .TanD "0.0" .TanDFreq "0.0" .TanDGiven "False" .TanDModel "ConstTanD" .KappaM "0" .TanDM "0.0" .TanDMFreq "0.0" .TanDMGiven "False" .TanDMMModel "ConstTanD" .DispModelEps "None" .DispModelMue "None" .DispersiveFittingSchemeEps "General 1st" .DispersiveFittingSchemeMue "General 1st" .UseGeneralDispersionEps "False" .UseGeneralDispersionMue "False" .FrqType "all" .Type "Lossy metal" .SetMaterialUnit "GHz", "mm" .Mue "1.0" .Kappa "3.56e+007" .Rho "2700.0" .ThermalType "Normal" .ThermalConductivity "237.0" .HeatCapacity "0.9" .MechanicsType "Isotropic"	line_name2 = "line3_" & 4*i+1454 With Line .Reset : .Name line_name2 : .Curve "drv3" : .X1 x2 : .Y1 y2 : .X2 x3 : .Y2 y3 : .Create End With line_name3 = "line3_" & 2*i+800 With Line .Reset : .Name line_name3 : .Curve "drv3" : .X1 x3 : .Y1 y3 : .X2 x4 : .Y2 y4 : .Create End With line_name4 = "line3_" & 2*i+1200 With Line .Reset : .Name line_name4 : .Curve "drv3" : .X1 x4 : .Y1 y4 : .X2 x5 : .Y2 y5 : .Create End With Next i x6=((x5- 2*coils_profile)*3)+2*coils_profile c99=x5-x4 c100=c99-2*coils_profile h99=y4-y5 h100=h99*c100/c99 y6=y5-h100 x7=((x5- 2*coils_profile)*3)+2*coils_profile y7=y2-h99 x8=x2+2*coils_profile y8=y7+h100 x9=x2+2*coils_profile y9=y5-2*W line_name5 = "line3_" & 2*i+2000 With Line .Reset : .Name line_name5 : .Curve "drv3" : .X1 x5 : .Y1 y5 : .X2 x5 : .Y2 0 : .Create End With WCS.RotateWCS "U", 90 line_name6 = "line3_" & 2*i+200121212045345340 With Line .Reset : .Name line_name6 : .Curve "drv3" : .X1 xi/2 : .Y1 0 : .X2 xi/2 : .Y2 h_volta : .Create End With line_name7 = "line3_" & 2*i+200000000012121200
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<pre> .YoungsModulus "69" .PoissonsRatio "0.33" .ThermalExpansionRate "23" .Colour "1", "1", "0" .Wireframe "False" .Transparency "0" .Create End With With Background .Reset .Type "Normal" .Epsilon "1.0" .Mue "1.0" .ElConductivity "0.0" .ThermalType "Normal" .ThermalConductivity "0.0" .HeatCapacity "0.0" .Rho "0.0" .XminSpace "0.0" .XmaxSpace "0.0" .YminSpace "0.0" .YmaxSpace "0.0" .ZminSpace "0.0" .ZmaxSpace "0.0" .ApplyInAllDirections "False" End With Component.New "tube" With Brick .Reset .Name "tube_surface" .Component "tube" .Material "mat_caracteristics" .Xrange -material_lenght/2, material_lenght/2 .Yrange -material_width/2, material_width/2 .Zrange -material_thickness-liftoff- coils_thickness/2, material_thickness+driver_height+h_volta+driv er_coils_liftoff+liftoff+driver_thickness/2 .Create End With '-liftoff-coils_thickness/2 With Brick .Reset .Name "tube_cut" .Component "tube" .Material "mat_caracteristics" .Xrange -material_lenght/2, material_lenght/2 .Yrange -material_width/2, material_width/2 </pre>	<pre> With Line .Reset : .Name line_name7 : .Curve "drv3" : .X1 x5 : .Y1 0 : .X2 x5 : .Y2 h_volta : .Create End With WCS.RotateWCS "U", -90 WCS.MoveWCS "local", "0.0", "0.0", "h_volta" line_name8 = "line3_" & 2*i+200000000012121200 With Line .Reset : .Name line_name8 : .Curve "drv3" : .X1 xi/2 : .Y1 0 : .X2 x5 : .Y2 0 : .Create End With WCS.MoveWCS "local", "0.0", "0.0", "- h_volta" 'Draw the driver trace profile WCS.RotateWCS "U", 90 With Line .Reset : .Name "line4_1" : .Curve "drv4" : .X1 xi/2+coils_profile/2 : .Y1 - coils_thickness/2 : .X2 xi/2+coils_profile/2 : .Y2 coils_thickness/2 : .Create End With With Line .Reset : .Name "line4_2" : .Curve "drv4" : .X1 xi/2- coils_profile/2 : .Y1 -coils_thickness/2 : .X2 xi/2-coils_profile/2 : .Y2 coils_thickness/2 : .Create End With With Line .Reset : .Name "line4_3" : .Curve "drv4" : .X1 xi/2- coils_profile/2 : .Y1 -coils_thickness/2 : .X2 xi/2+coils_profile/2 : .Y2 - coils_thickness/2 : .Create End With With Line .Reset : .Name "line4_4" : .Curve "drv4" : .X1 xi/2- coils_profile/2 : .Y1 coils_thickness/2 : .X2 xi/2+coils_profile/2 : .Y2 coils_thickness/2 : .Create End With WCS.RotateWCS "U", -90 'COIL With Material .Reset </pre>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<pre> .Zrange -liftoff-coils_thickness/2, material_thickness+driver_height+h_volta+dri ver_coils_liftoff+liftoff+driver_thickness/2 .Create End With With Solid .Subtract "tube:tube_surface", "tube:tube_cut" End With With WCS .SetNormal "0", "0", "1" : .SetUVector "0", "1", "0" : .ActivateWCS "local" End With ' Align WCS with YZ plane With WCS .SetNormal "1", "0", "0" .SetUVector "0", "1", "0" .ActivateWCS "local" End With WCS.RotateWCS "U", -90 h34=((xi+2*coils_profile)/Tan(theta*pi/180)) h12=(xi/Tan(theta*pi/180)) W=coils_profile/Sin(theta*pi/180) h1=(2*W- 2*coils_profile/Tan(theta*pi/180)) x5 = xi/2+ 2*coils_profile y5 = (2*yi-(yi-h12)-h34) y2 = -yi For i = 1 To voltas-1 x5 = x5 + 2*coils_profile y5 = y5 + h1 y2 = y2 - h2 Next i move_x = x5-coils_profile move_y=-move_coils_up WCS.MoveWCS "local", 0, - 2*move_y, "0.0" ' Draw the driver trace path h34=((xi+2*coils_profile)/Tan(theta*pi/180)) h1=(2*W- 2*coils_profile/Tan(theta*pi/180)) h2=(2*W+2*coils_profile/Tan(theta*p i/180)) h3=(2*W- 2*coils_profile/Tan(theta*pi/180)) h4=(2*W+2*coils_profile/Tan(theta*p i/180)) With Line .Reset : .Name </pre>	<pre> .Name "Copper (annealed)" .FrqType "static" .Type "Normal" .SetMaterialUnit "Hz", "mm" .Epsilon "1" .Mue "1.0" .Kappa "5.8e+007" .TanD "0.0" .TanDFreq "0.0" .TanDGiven "False" .TanDModel "ConstTanD" .KappaM "0" .TanDM "0.0" .TanDMFreq "0.0" .TanDMGiven "False" .TanDMModel "ConstTanD" .DispModelEps "None" .DispModelMue "None" .DispersiveFittingSchemeEps "1st Order" .DispersiveFittingSchemeMue "1st Order" .UseGeneralDispersionEps "False" .UseGeneralDispersionMue "False" .FrqType "all" .Type "Lossy metal" .SetMaterialUnit "GHz", "mm" .Mue "1.0" .Kappa "5.8e+007" .Rho "8930.0" .ThermalType "Normal" .ThermalConductivity "401.0" .HeatCapacity "0.39" .MetabolicRate "0" .BloodFlow "0" .VoxelConvection "0" .MechanicsType "Isotropic" .YoungsModulus "120" .PoissonsRatio "0.33" .ThermalExpansionRate "17" .Colour "1", "1", "0" .Wireframe "False" .Reflection "False" .Allowoutline "True" .Transparentoutline "False" .Transparency "0" .Create End With With Coil .Reset .Name "coil1" .Material "Copper (annealed)" .ProjectProfileToPathAdvanced "True" .ProfileName "drv2:line2_1" </pre>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<pre> "line1_1" : .Curve "drv1" : .X1 xi/2 : .Y1 0 : .X2 xi/2 : .Y2 -yi : .Create End With With Line .Reset : .Name "line1_2" : .Curve "drv1" : .X1 xi/2 : .Y1 - yi : .X2 -xi/2 : .Y2 -yi+h12 : .Create End With With Line .Reset : .Name "line1_3" : .Curve "drv1" : .X1 -xi/2 : .Y1 - yi+h12 : .X2 -xi/2 : .Y2 (2*yi-(yi-h12)): .Create End With With Line .Reset : .Name "line1_4" : .Curve "drv1" : .X1 -xi/2 : .Y1 (2*yi- (yi-h12)) : .X2 xi/2+2*coils_profile : .Y2 (2*yi- (yi-h12)-h34): .Create End With x1 = xi/2 y1 = (2*yi-(yi-h12)-h34)-h1 x2 = xi/2 y2 = -yi x3=-xi/2 y3=-yi+h12 x4=-xi/2 y4=(2*yi-(yi-h12)) x5 = xi/2+ 2*coils_profile y5 = (2*yi-(yi-h12)-h34) For i = 1 To voltas-1 x1 = x1 + 2*coils_profile y1 = y1 + h1 x2 = x2 + 2*coils_profile y2 = y2 - h2 x3 = x3 - 2*coils_profile y3 = y3 - h3 x4 = x4 - 2*coils_profile y4 = y4 + h4 x5 = x5 + 2*coils_profile y5 = y5 + h1 line_name1 = "line1_" & 4*i+986 With Line .Reset : .Name line_name1 : .Curve "drv1" : .X1 x1 : .Y1 y1 : .X2 x2 : .Y2 y2 : .Create End With line_name2 = "line1_" & 4*i+1454 With Line .Reset : .Name line_name2 : .Curve "drv1" : .X1 x2 : .Y1 </pre>	<pre> .PathName "drv1:line1_1" .Current "coil_current" .Phase "coil_phase" .NTurns "coil_turns" .Create End With With Coil .Reset .Name "coil2" .Material "Copper (annealed)" .ProjectProfileToPathAdvanced "True" .ProfileName "drv4:line4_1" .PathName "drv3:line3_1" .Current "coil_current" .Phase "coil_phase" .NTurns "coil_turns" .Create End With WCS.MoveWCS "local", 0, 2*move_y+2*yi+(voltas-1)*4*W+2*W, h_volta+driver_coils_liftoff ' Generate the driver trace coils WCS.MoveWCS "local", 0, driver_position , 0 WCS.RotateWCS "V", -90 With Line .Reset : .Name "line5_1" : .Curve "drv5" : .X1 0 : .Y1 - driver_thickness/2 : .X2 0 : .Y2 driver_thickness/2 : .Create End With With Line .Reset : .Name "line5_2" : .Curve "drv5" : .X1 driver_thickness : .Y1 -driver_thickness/2 : .X2 driver_thickness : .Y2 driver_thickness/2 : .Create End With With Line .Reset : .Name "line5_3" : .Curve "drv5" : .X1 0 : .Y1 - driver_thickness/2 : .X2 driver_thickness : .Y2 -driver_thickness/2 : .Create End With With Line .Reset : .Name "line5_4" : .Curve "drv5" : .X1 0 : .Y1 driver_thickness/2 : .X2 driver_thickness : .Y2 driver_thickness/2 : .Create End With WCS.RotateWCS "V", 90 </pre>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<pre> y2 : .X2 x3 : .Y2 y3 : .Create End With line_name3 = "line1_" & 2*i+800 With Line .Reset : .Name line_name3 : .Curve "drv1" : .X1 x3 : .Y1 y3 : .X2 x4 : .Y2 y4 : .Create End With line_name4 = "line1_" & 2*i+1200 With Line .Reset : .Name line_name4 : .Curve "drv1" : .X1 x4 : .Y1 y4 : .X2 x5 : .Y2 y5 : .Create End With Next i x6=((x5- 2*coils_profile)*3)+2*coils_profile c99=x5-x4 c100=c99-2*coils_profile h99=y4-y5 h100=h99*c100/c99 y6=y5-h100 x7=((x5- 2*coils_profile)*3)+2*coils_profile y7=y2-h99 x8=x2+2*coils_profile y8=y7+h100 x9=x2+2*coils_profile y9=y5-2*W line_name5 = "line1_" & 2*i+2000 With Line .Reset : .Name line_name5 : .Curve "drv1" : .X1 x5 : .Y1 y5 : .X2 x5 : .Y2 0 : .Create End With WCS.RotateWCS "U", 90 line_name6 = "line1_" & 2*i+200121212045345340 With Line .Reset : .Name line_name6 : .Curve "drv1" : .X1 xi/2 : .Y1 0 : .X2 xi/2 : .Y2 h_volta : .Create End With line_name7 = "line1_" & 2*i+2000000000012121200 With Line .Reset : .Name line_name7 : .Curve "drv1" : .X1 x5 : .Y1 0 : .X2 x5 : .Y2 h_volta : .Create End With </pre>	<pre> ' Align WCS with YZ plane ' Draw the driver trace path driver_y1=0 For i = 1 To driver_num-1 driver_y2=driver_y1-dist_drivers driver_y3=driver_y2-dist_drivers line_name2 = "line6_" & 2*i+28000 With Line .Reset : .Name line_name2 : .Curve "drv6" : .X1 - driver_lenght/2 : .Y1 driver_y2 : .X2 - driver_lenght/2 : .Y2 driver_y3 : .Create End With driver_y1=driver_y2-dist_drivers Next i driver_y1=0 For i = 1 To driver_num driver_y2=driver_y1-dist_drivers driver_y3=driver_y2-dist_drivers line_name1 = "line6_" & 2*i+20000 With Line .Reset : .Name line_name1 : .Curve "drv6" : .X1 driver_lenght/2 : .Y1 driver_y1 : .X2 driver_lenght/2 : .Y2 driver_y2 : .Create End With line_name2 = "line6_" & 2*i+21000 With Line .Reset : .Name line_name2 : .Curve "drv6" : .X1 driver_lenght/2 : .Y1 driver_y1 : .X2 - driver_lenght/2 : .Y2 driver_y1 : .Create End With line_name2 = "line6_" & 2*i+22000 With Line .Reset : .Name line_name2 : .Curve "drv6" : .X1 driver_lenght/2 : .Y1 driver_y2 : .X2 - driver_lenght/2 : .Y2 driver_y2 : .Create End With driver_y1=driver_y2-dist_drivers Next i WCS.RotateWCS "U", 90 WCS.RotateWCS "V", -90 WCS.MoveWCS "local", 0, 0, driver_lenght/2 line_name2 = "line6_" & 1 With Line .Reset : .Name </pre>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<pre> WCS.RotateWCS "U", -90 WCS.MoveWCS "local", "0.0", "0.0", "h_volta" line_name8 = "line1_" & 2*i+2000000012121200 With Line .Reset : .Name line_name8 : .Curve "drv1" : .X1 xi/2 : .Y1 0 : .X2 x5 : .Y2 0 : .Create End With WCS.MoveWCS "local", "0.0", "0.0", "- h_volta" ' Draw the driver trace profile WCS.RotateWCS "U", 90 With Line .Reset : .Name "line2_1" : .Curve "drv2" : .X1 xi/2+coils_profile/2 : .Y1 - coils_thickness/2 : .X2 xi/2+coils_profile/2 : .Y2 coils_thickness/2 : .Create End With With Line .Reset : .Name "line2_2" : .Curve "drv2" : .X1 xi/2- coils_profile/2 : .Y1 -coils_thickness/2 : .X2 xi/2-coils_profile/2 : .Y2 coils_thickness/2 : .Create End With With Line .Reset : .Name "line2_3" : .Curve "drv2" : .X1 xi/2- coils_profile/2 : .Y1 -coils_thickness/2 : .X2 xi/2+coils_profile/2 : .Y2 - coils_thickness/2 : .Create End With With Line .Reset : .Name "line2_4" : .Curve "drv2" : .X1 xi/2- coils_profile/2 : .Y1 coils_thickness/2 : .X2 xi/2+coils_profile/2 : .Y2 coils_thickness/2 : .Create End With WCS.RotateWCS "U", -90 '----- ----- -- '----- NEXT COIL----- ----- '----- ----- </pre>	<pre> line_name2 : .Curve "drv6" : .X1 0 : .Y1 0 : .X2 0 : .Y2 h_driver : .Create End With line_name2 = "line6_" & 2*i+25000 With Line .Reset : .Name line_name2 : .Curve "drv6" : .X1 - driver_y2 : .Y1 0 : .X2 -driver_y2 : .Y2 h_driver : .Create End With line_name2 = "line6_" & 2*i+26000 With Line .Reset : .Name line_name2 : .Curve "drv6" : .X1 0 : .Y1 h_driver : .X2 -driver_y2 : .Y2 h_driver : .Create End With With Coil .Reset .Name "driver" .Material "Copper (annealed)" .ProjectProfileToPathAdvanced "True" .ProfileName "drv5:line5_1" .PathName "drv6:line6_1" .Current "driver_current" .Phase "driver_phase" .NTurns "driver_turns" .Create End With WCS.MoveWCS "local", 0, 0, - driver_lenght/2 WCS.RotateWCS "V", 90 WCS.RotateWCS "U", -90 WCS.MoveWCS "local", 0, - driver_position, 0 WCS.RotateWCS "W", 90 WCS.MoveWCS "local", 0, 0, - h_volta-driver_coils_liftoff ' With WCS .SetNormal "0", "0", "1" : .SetUVector "0", "1", "0" : .ActivateWCS "local" End With WCS.RotateWCS "W", "defect_angle" With Brick .Reset .Name "defect" .Component "tube" .Material "Vacuum" .Xrange -defect_width/2+defect_x, </pre>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<pre>-- WCS.MoveWCS "local", "0.0", -2*yi- (voltas-1)*4*W-2*W, "0.0" h12=xi/Tan(theta*pi/180) h34=((xi+2*coils_profile)/Tan(theta*pi/180)) W=coils_profile/Sin(theta*pi/180) h1=(2*W- 2*coils_profile/Tan(theta*pi/180)) h2=(2*W+2*coils_profile/Tan(theta*p i/180)) h3=(2*W- 2*coils_profile/Tan(theta*pi/180)) h4=(2*W+2*coils_profile/Tan(theta*p i/180))</pre>	<pre>defect_width/2+defect_x .Yrange -defect_lenght/2+defect_y, defect_lenght/2+defect_y .Zrange - defect_depth+liftoff+coils_thickness/2, - liftoff-coils_thickness/2 .Create End With With Solid .Subtract "tube:tube_surface", "tube:defect" End With Component.New "ardefeito" With Brick .Reset .Name "defeito" .Component "ardefeito" .Material "Vacuum" .Xrange -defect_width/2+defect_x, defect_width/2+defect_x .Yrange -defect_lenght/2+defect_y, defect_lenght/2+defect_y .Zrange - defect_depth+liftoff+coils_thickness/2, - liftoff-coils_thickness/2 .Create End With End Sub</pre>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Anexo 2 – Caracterização das sondas em substrato flexível

Tabela A1 – Varrimento em frequência da sonda trapezoidal vAx2x8			
Ensaio	Posicionamento	Bobina	Figura
1	Vazio	L1 (danificada)	-
2	Vazio	L2	Figura A1
3	Vazio	L3	Figura A1
4	Vazio	L4	Figura A1
5	Vazio	L5	Figura A1
6	Vazio	L6	Figura A1
7	Interior do tubo	L1 (danificada)	-
8	Interior do tubo	L2	Figura A2
9	Interior do tubo	L3	Figura A2
10	Interior do tubo	L4	Figura A2
11	Interior do tubo	L5	Figura A2
12	Interior do tubo	L6	Figura A2

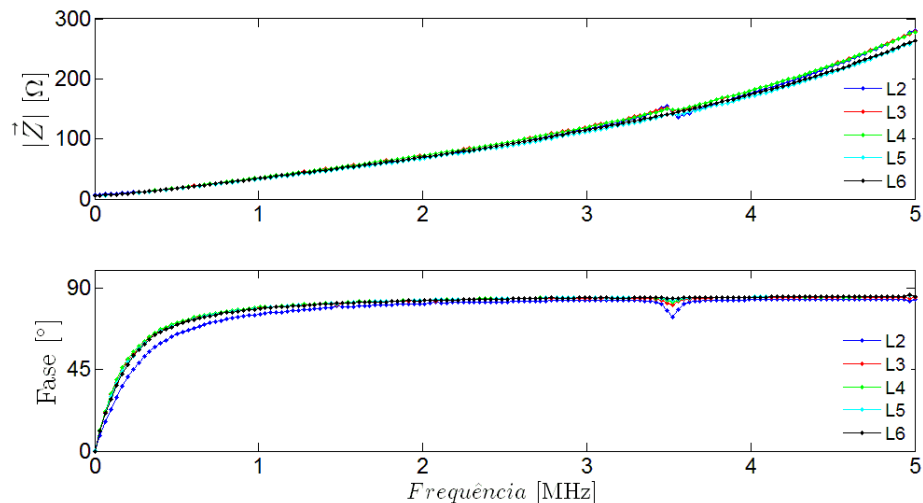


Figura A1 – Varrimento em frequência de 5 bobinas da sonda trapezoidal vAx2x8 em vazio

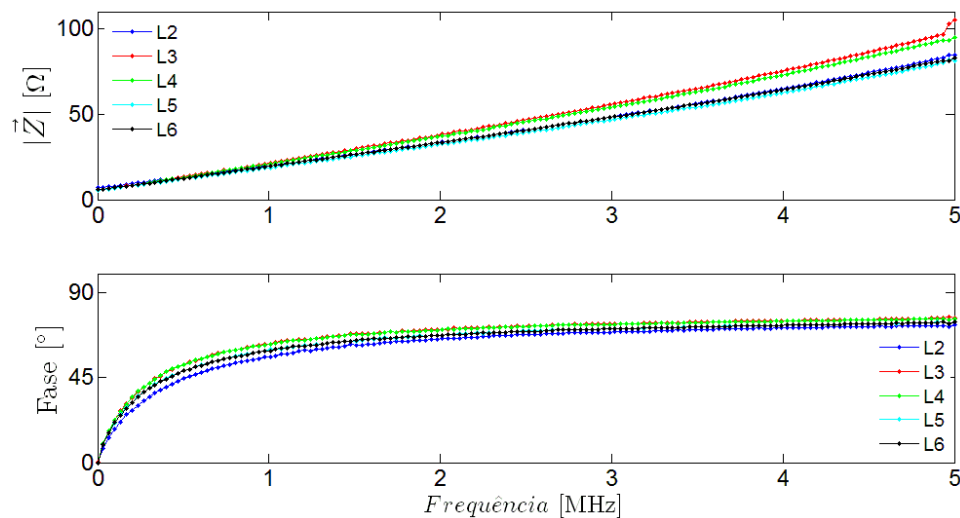


Figura A2 – Varrimento em frequência de 5 bobinas da sonda trapezoidal vAx2x8 no interior do tubo do ITER

Ensaio	Posicionamento	Bobina	Figura
1	Vazio	L1 (danificada)	-
2	Vazio	L2	Figura A3
3	Vazio	L3	Figura A3
4	Vazio	L4	Figura A3
5	Interior do tubo	L1 (danificada)	-
6	Interior do tubo	L2	Figura A4
7	Interior do tubo	L3	Figura A4
8	Interior do tubo	L4	Figura A4

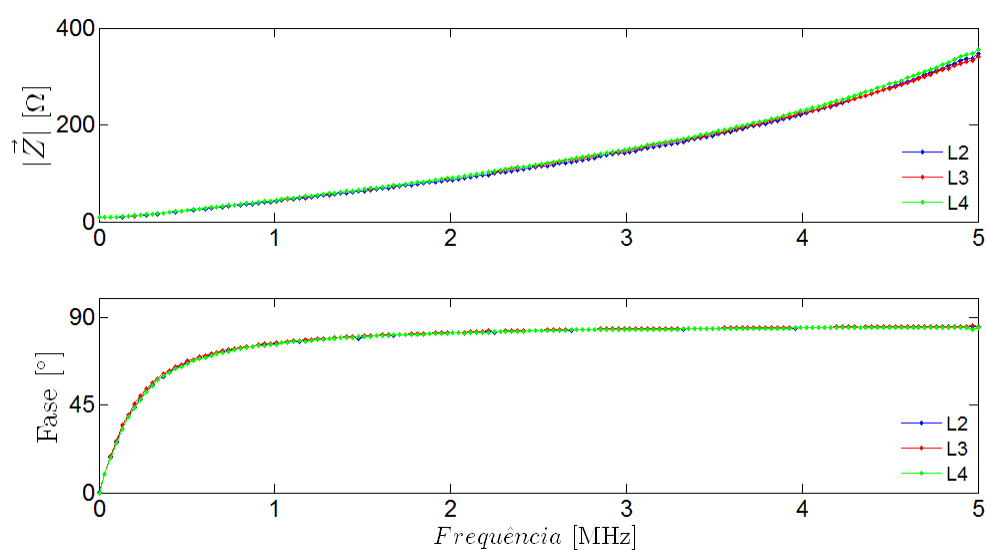


Figura A3 – Varrimento em frequência de 3 bobinas da sonda trapezoidal vAx4 em vazio

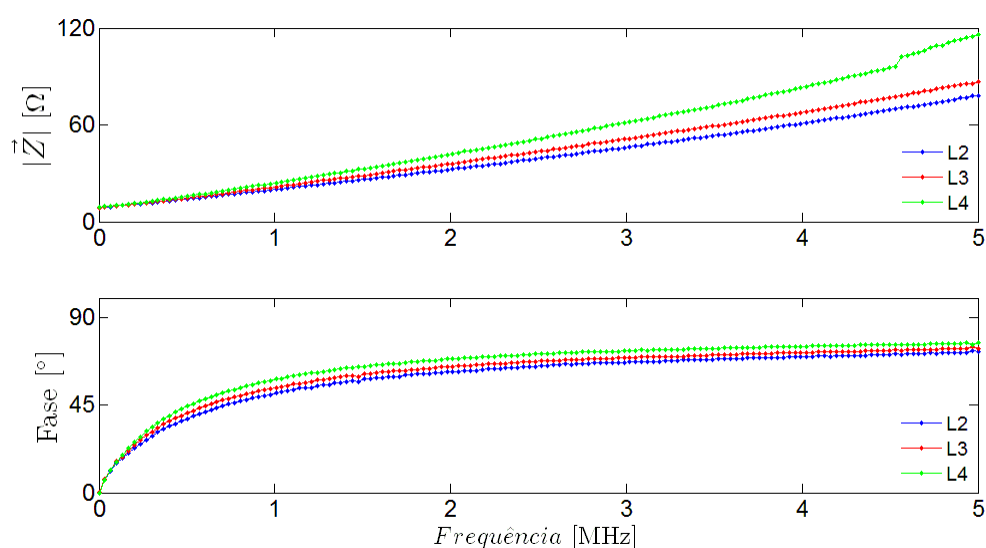


Figura A4 – Varrimento em frequência de 3 bobinas da sonda trapezoidal vAx4 no interior do tubo

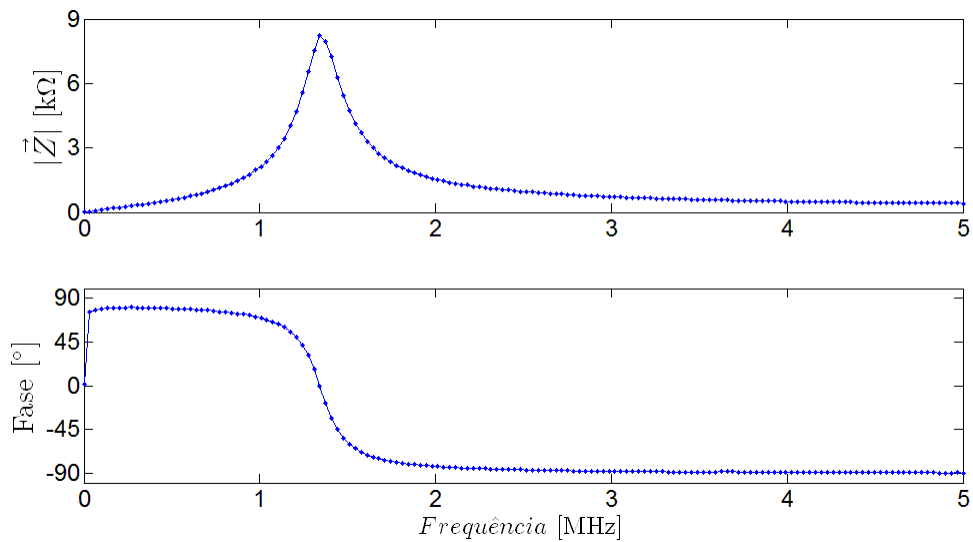


Figura A5 – Varrimento em frequência do enrolamento no interior do tubo

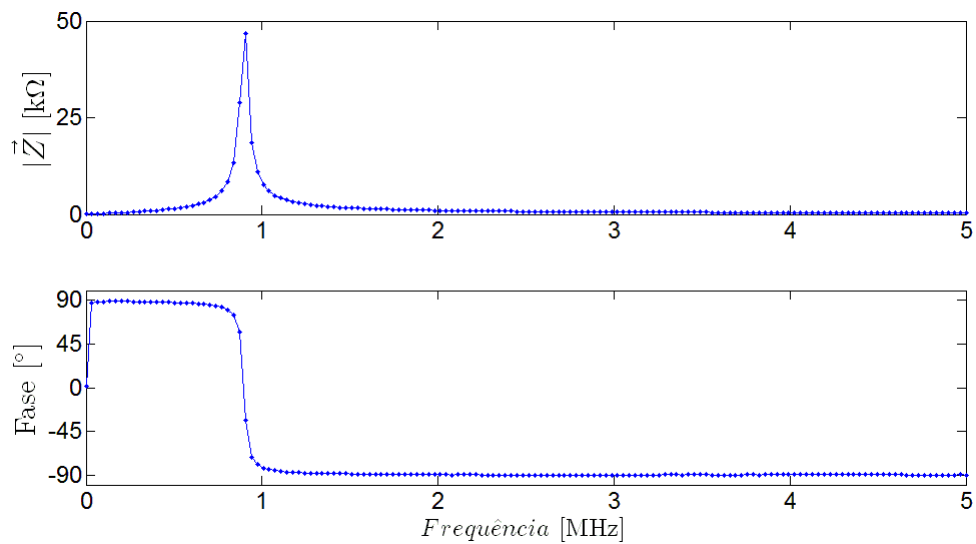


Figura A6 – Varrimento em frequência do enrolamento em vazio

Anexo 3 – Caracterização da sonda convencional

Tabela A3 – Varrimento em frequência da sonda convencional

Ensaio	Posicionamento	Bobina	Figura
1	Vazio	Int.	Figura A7
2	Interior do tubo	Int.	Figura A8
3	Vazio	Ext.	Figura A7
4	Interior do tubo	Ext.	Figura A8
5	Vazio	Int. e Ext. em série com \vec{B} a somar	Figura A9
6	Interior do tubo	Int. e Ext. em série com \vec{B} a somar	Figura A11
7	Vazio	Int. e Ext. em série a anular \vec{B} (dif.)	Figura A10
8	Interior do tubo	Int. e Ext. em série a anular \vec{B} (dif.)	Figura A11

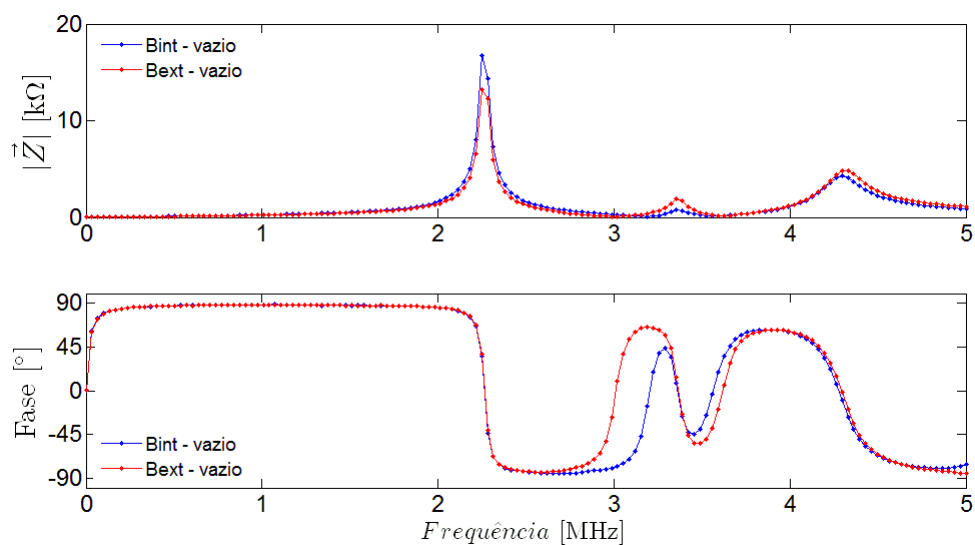


Figura A7 – Varrimento em frequência de cada bobina em vazio

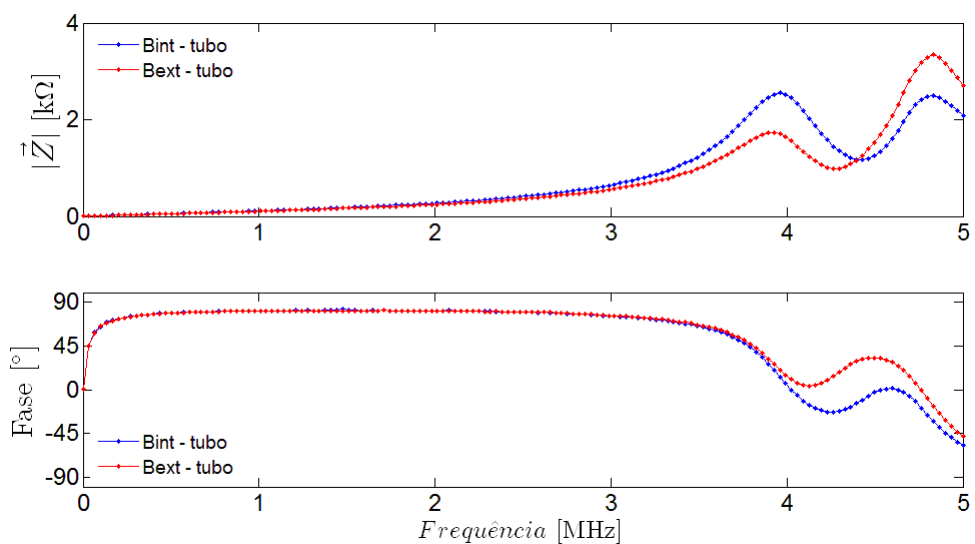


Figura A8 – Varrimento em frequência de cada bobina no interior do tubo

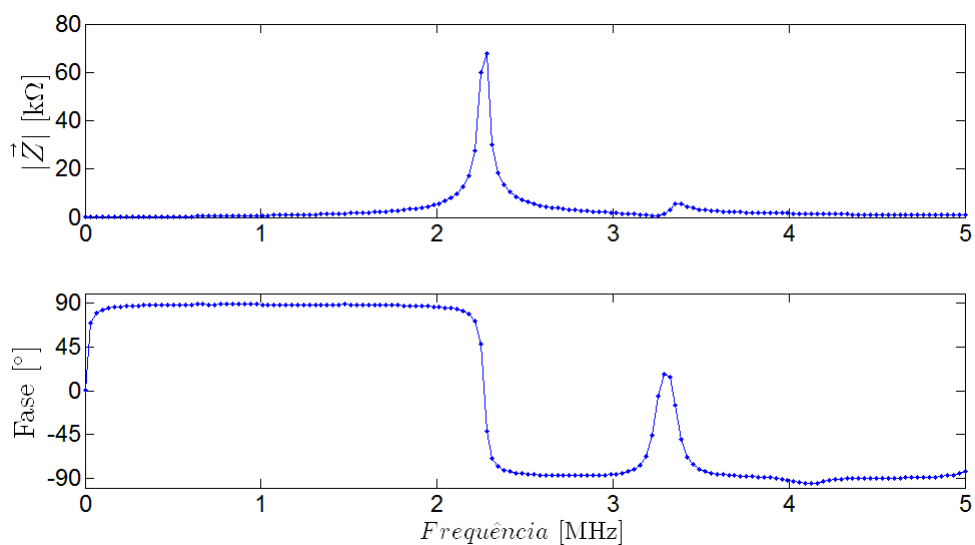


Figura A9 – Varrimento em frequência das bobinas ligadas em série com \vec{B} a somar em vazio

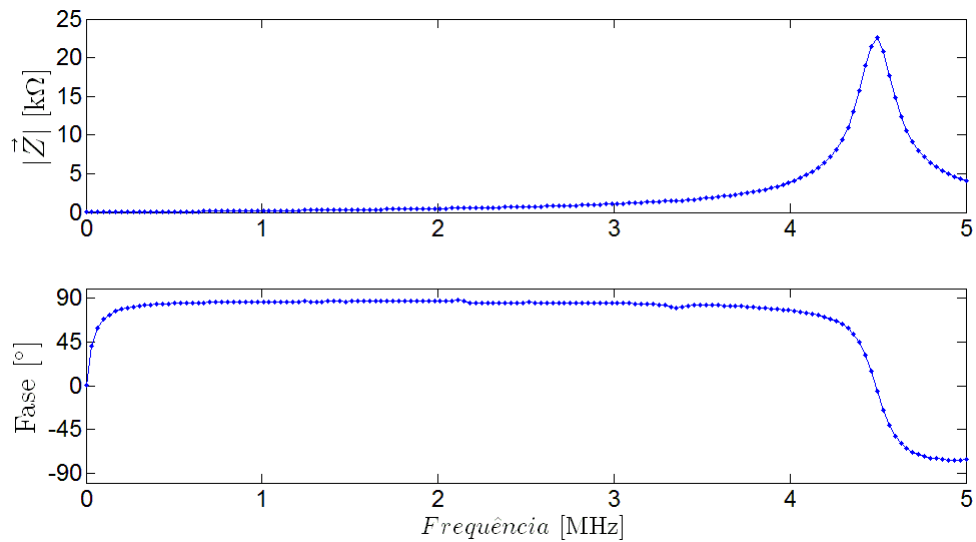


Figura A10 – Varrimento em frequência das bobinas ligadas em série a anular \vec{B} (dif.) em vazio

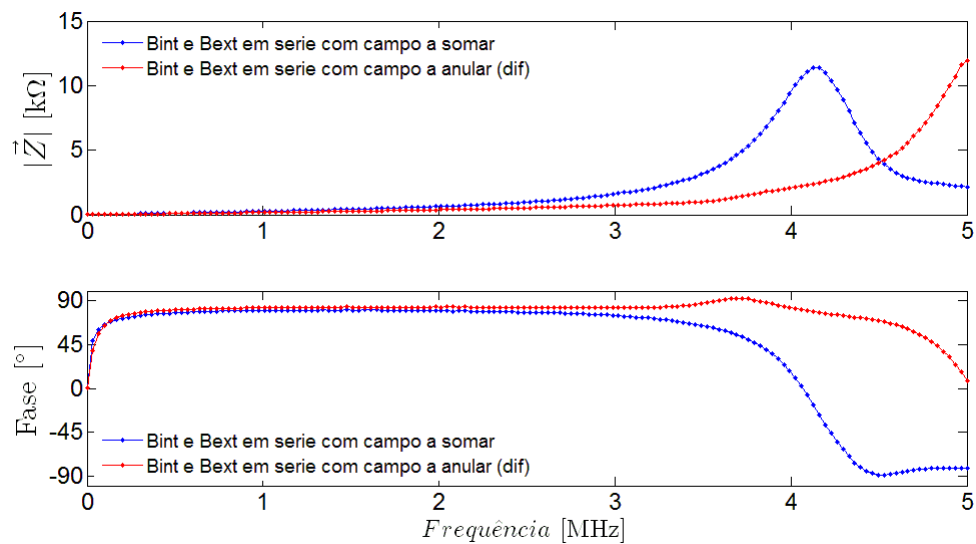


Figura A11 – Varrimento em frequência das bobinas ligadas em série no interior do tubo

Anexo 4 – Caracterização da sonda de três enrolamentos

Tabela A4 – Varrimento em frequência da sonda com três enrolamentos

Ensaio	Posicionamento	Bobina	Figura
1	Vazio	Bd	Figura A12
2	Vazio	Bc	Figura A12
3	Vazio	Be	Figura A12
4	Vazio	Be e Bc. em série com \vec{B} a somar	Figura A14
5	Vazio	Be e Bc. em série a anular \vec{B} (dif.)	Figura A15
6	Interior do tubo	Bd	Figura A13
7	Interior do tubo	Bc	Figura A13
8	Interior do tubo	Be	Figura A13
9	Interior do tubo	Be e Bc. em série com \vec{B} a somar	Figura A14
10	Interior do tubo	Be e Bc. em série a anular \vec{B} (dif.)	Figura A15

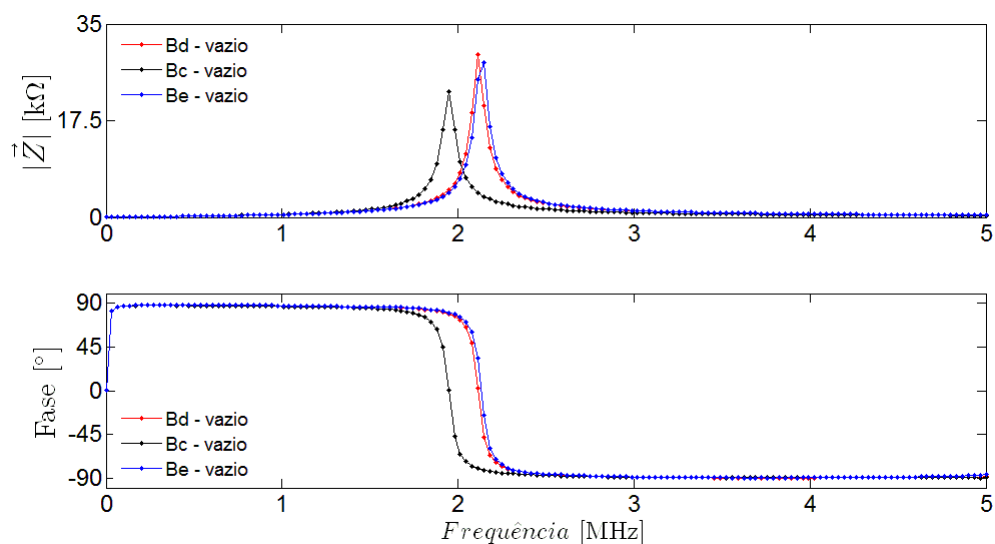


Figura A12 – Varrimento em frequência dos três enrolamentos em vazio

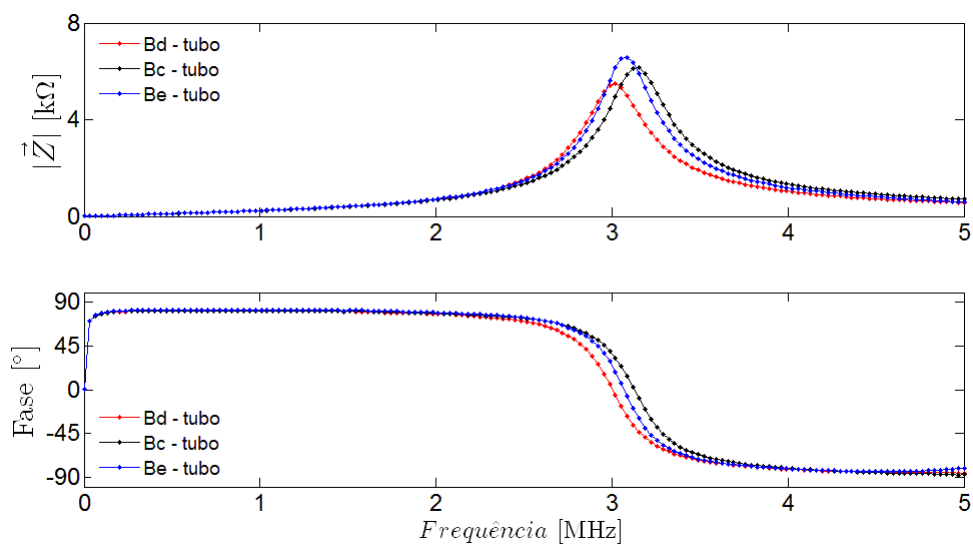


Figura A13 – Varrimento em frequência dos três enrolamentos no interior do tubo

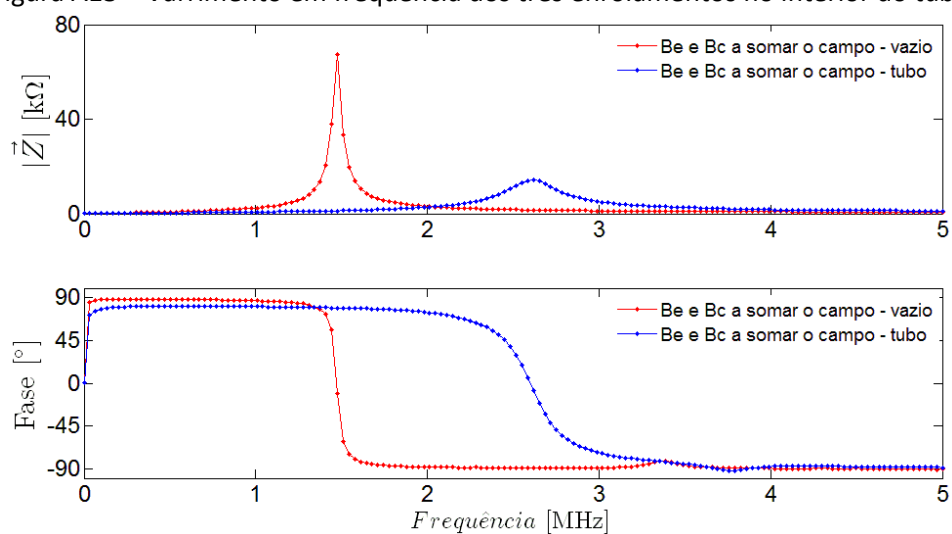


Figura A14 – Varrimento em frequência das bobinas Be e Bc ligadas em série com \vec{B} a somar

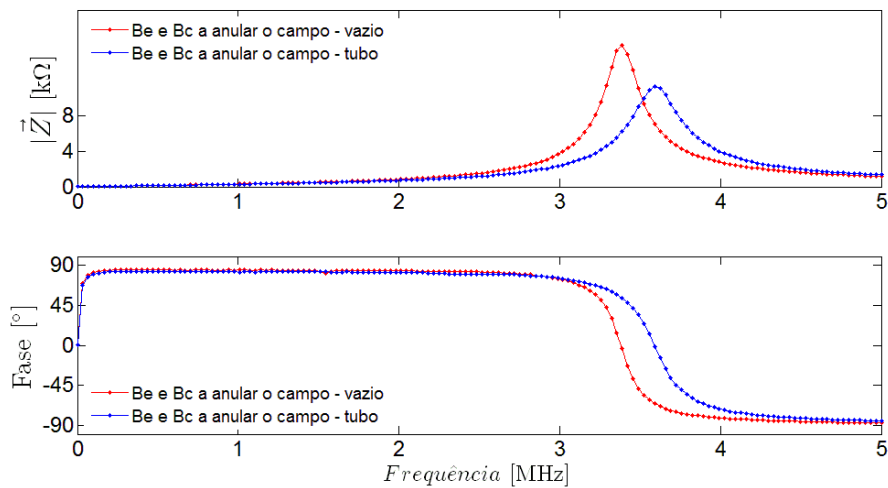


Figura A15 – Varrimento em frequência das bobinas Be e Bc ligadas em série a anular \vec{B}

Anexo 5 – Caracterização da excitação axial – Configuração 3

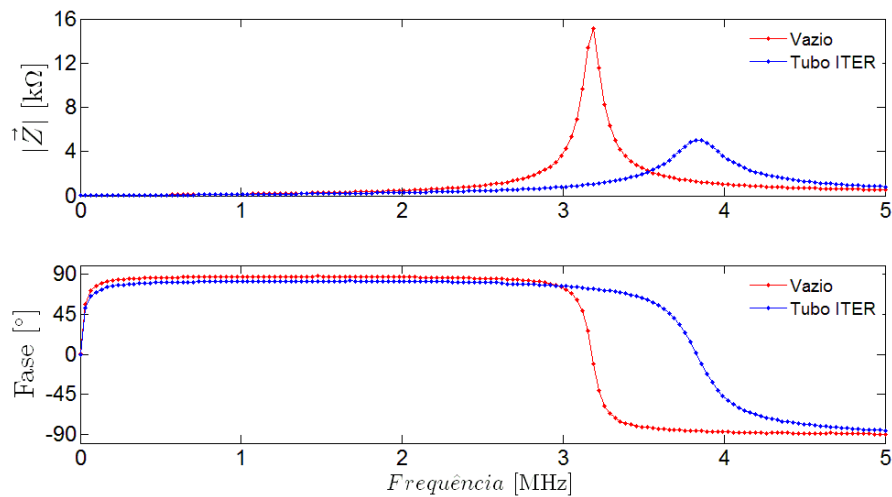


Figura A16 – Varrimento em frequência da excitação axial

Anexo 6 – Caracterização da excitação tangencial – Configuração 4

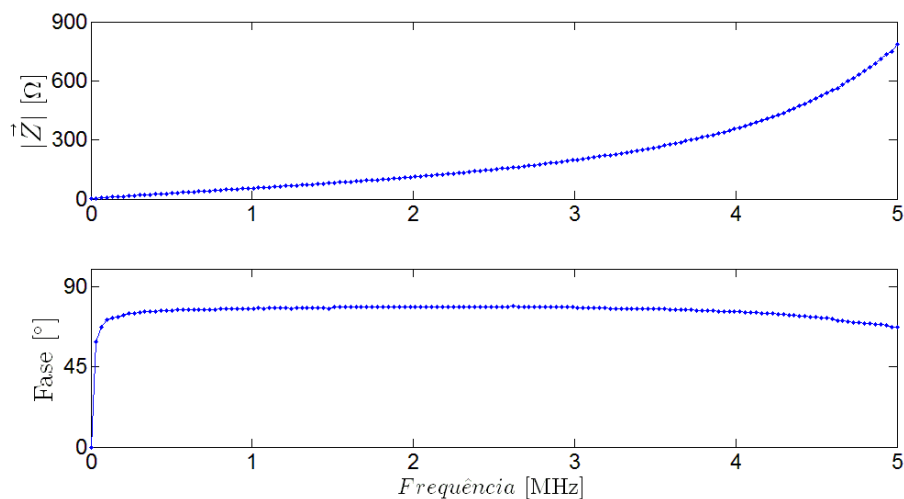


Figura A17 – Varrimento em frequência do enrolamento no interior do tubo (15 espiras)

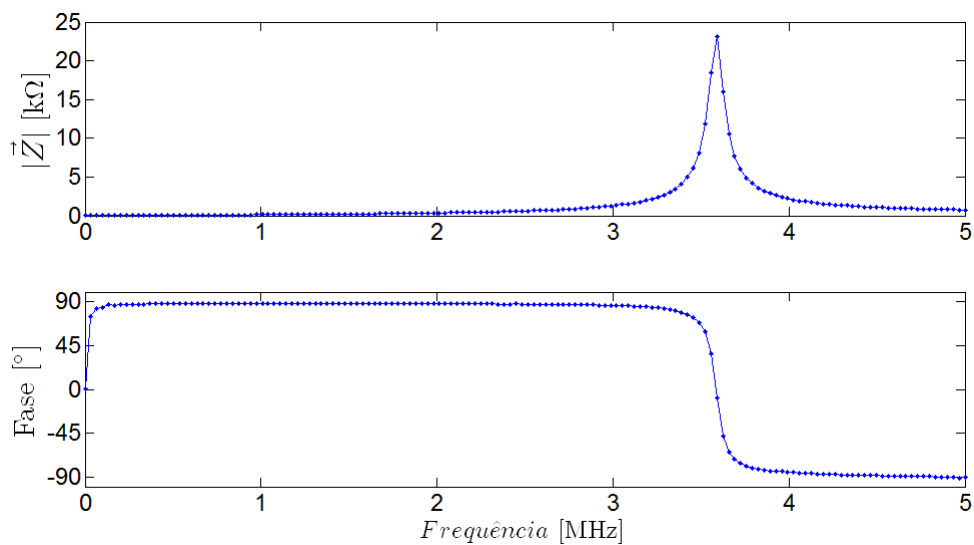


Figura A18 – Varrimento em frequência do enrolamento em vazio (15 espiras)

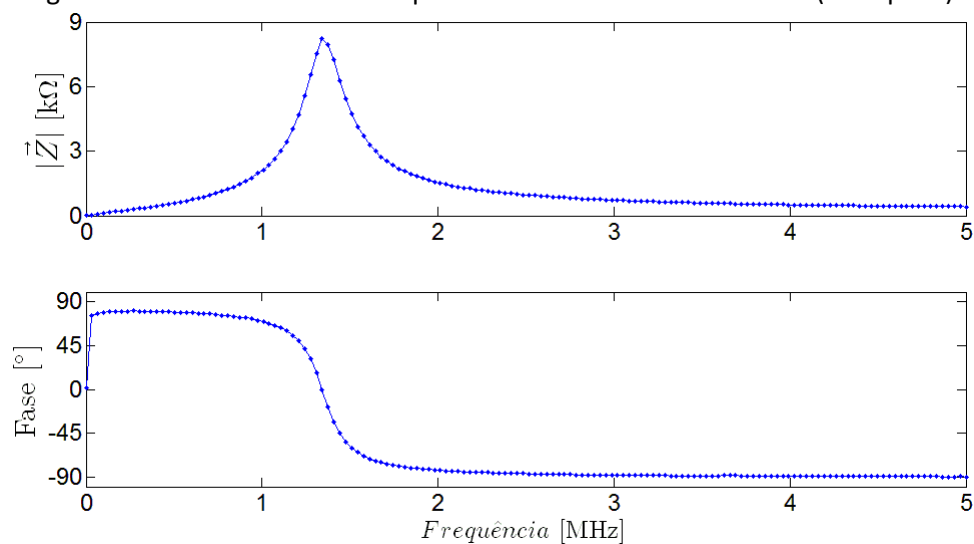


Figura A19 – Varrimento em frequência do enrolamento no interior do tubo (80 espiras)

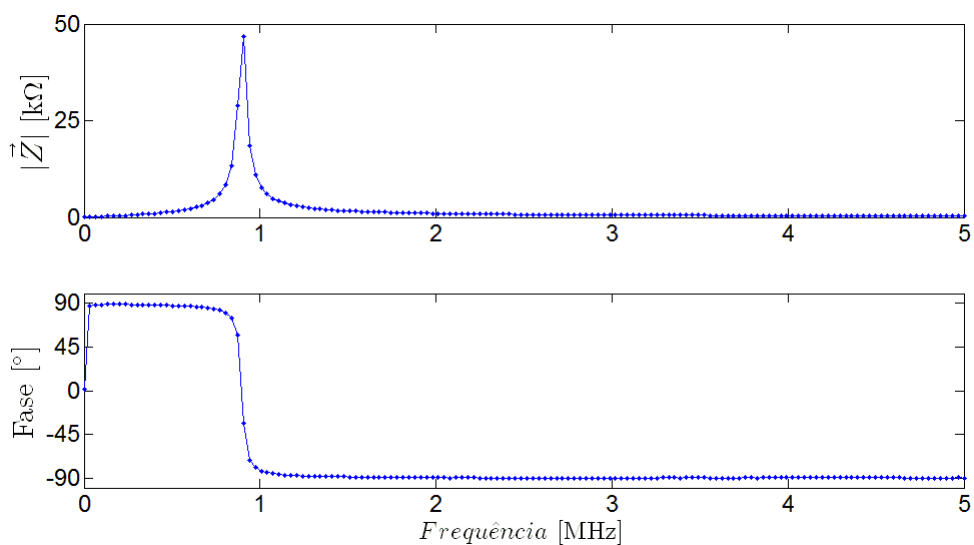


Figura A20 – Varrimento em frequência do enrolamento em vazio (80 espiras)

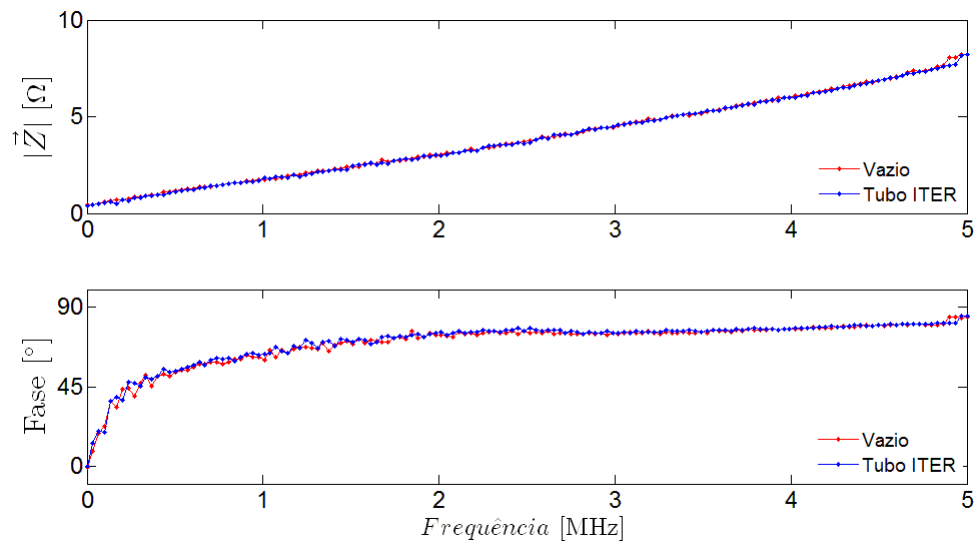


Figura A21 – Varrimento em frequência do enrolamento (10 espiras)

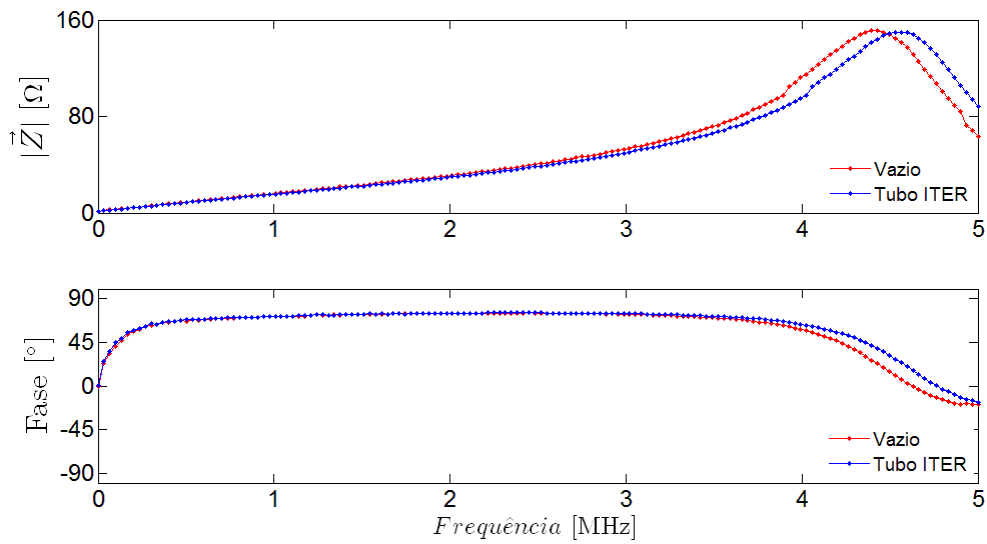


Figura A22 – Varrimento em frequência do enrolamento (10 + 10 espiras)

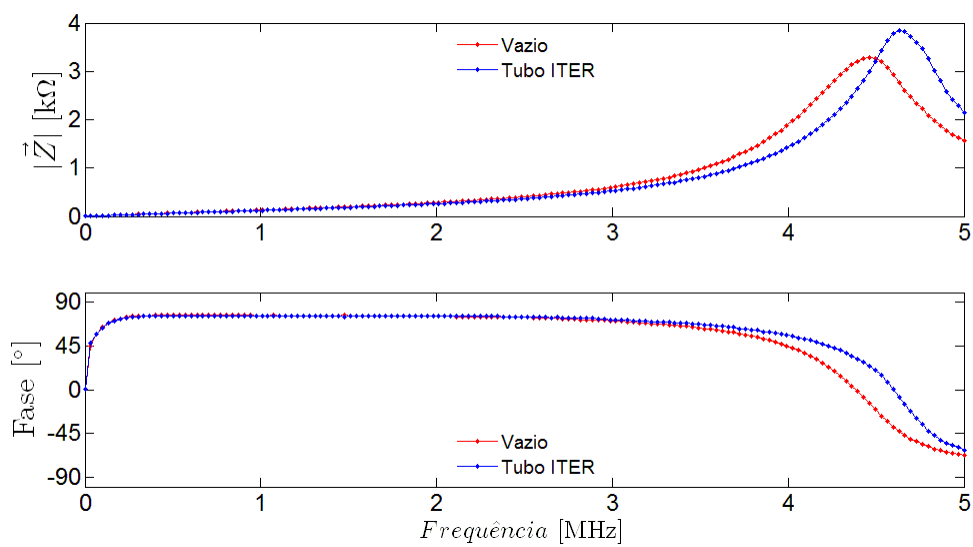


Figura A23 – Varrimento em frequência do enrolamento (10 + 10 + 20 espiras)

Anexo 7 – Resultados ensaios sonda comercial

Tabela A5 – Parâmetros dos ensaios realizados

Ensaio	Frequência (kHz)	Ângulo	Ganho (dB)	Abordagem	Tubo	Figura
1	100	194	80	1	ITER	Figura A24
2	100	194	80	1	ITER	Figura A25
3	200	225	80	1	ITER	Figura 6.9
4	500	226	75	1	ITER	Figura A26
5	300	145	75	1	ITER	Figura A27
6	250	99	75	1	ITER	Figura A28
7	1000	104	75	1	ITER	Figura 6.10
8	2000	35	80	1	ITER	Figura A29
9	200	138	80	2	ITER	Figura A30
10	100	138	80	2	ITER	Figura A31
11	100	138	80	2	ITER	Figura A32
12	100	138	80	2	ITER	Figura A33
13	100	138	80	2	ITER	Figura A34
14	100	138	60	4	ITER	Figura A35
15	100	138	80	5	ITER	Figura A36
16	300	138	70	5	ITER	Figura A37
17	200	138	70	5	ITER	Figura A38
18	100	231	70	3	ITER	Figura A39
19	200	231	75	3	ITER	Figura A40
20	200	231	65	3	ITER	Figura A41
21	200	231	70	3	ITER	Figura A42
22	1000	0	70	1	Aço ST 52	Figura A43
23	500	0	70	1	Aço ST 52	Figura 6.11
24	50	0	75	1	Aço ST 52	Figura A44

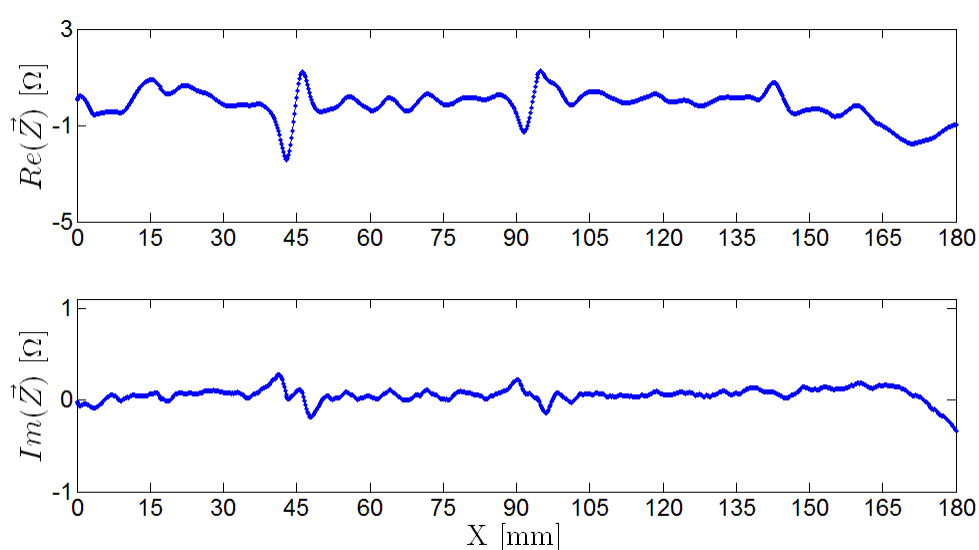


Figura A24 – Ensaio 1 – Abordagem 1 – 100 kHz – a avançar

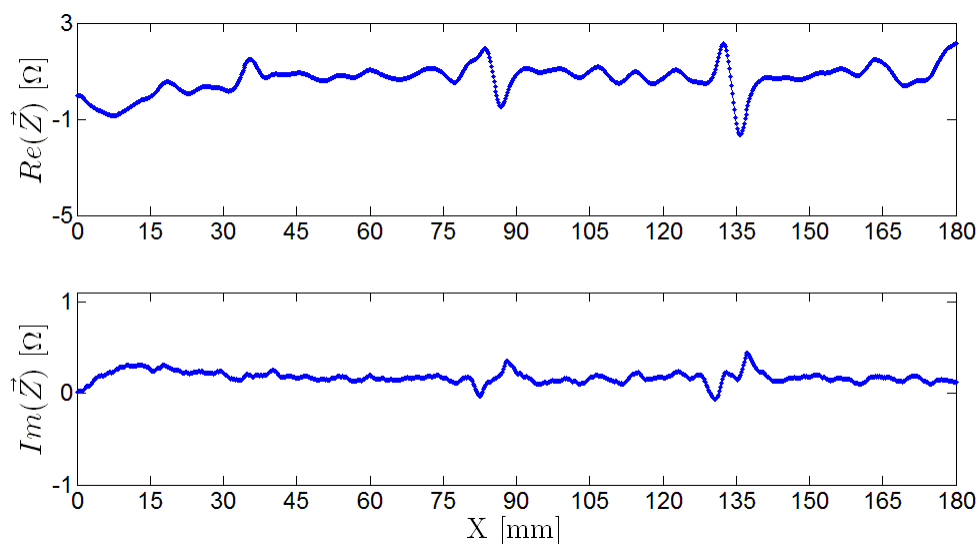


Figura A25 – Ensaio 2 – Abordagem 1 – 100 kHz

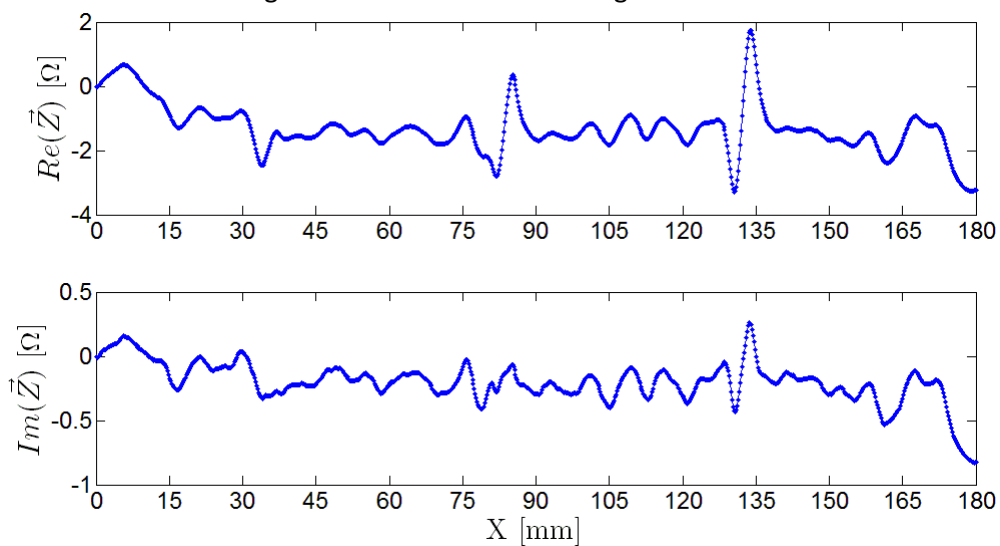


Figura A26 – Ensaio 4 – Abordagem 1 – 500 kHz

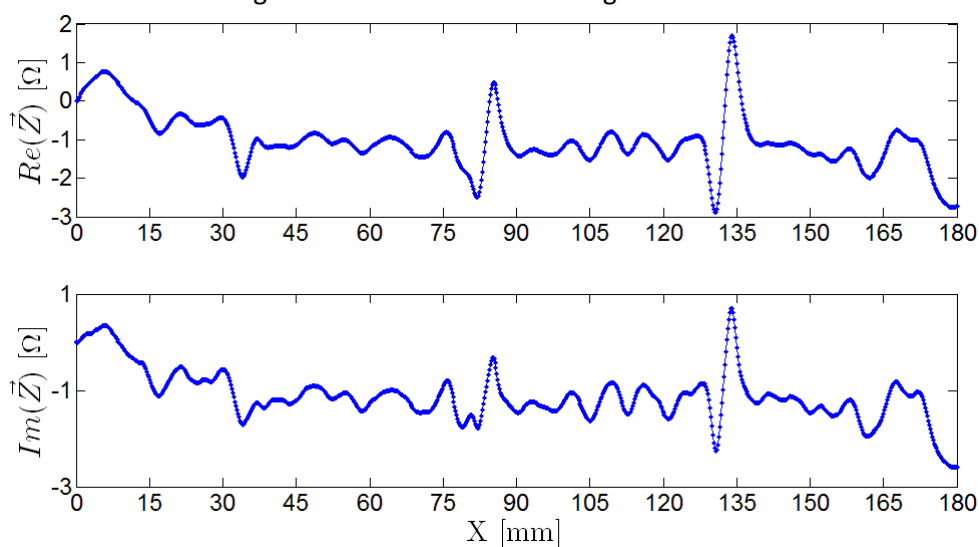


Figura A27 – Ensaio 5 – Abordagem 1 – 300 kHz

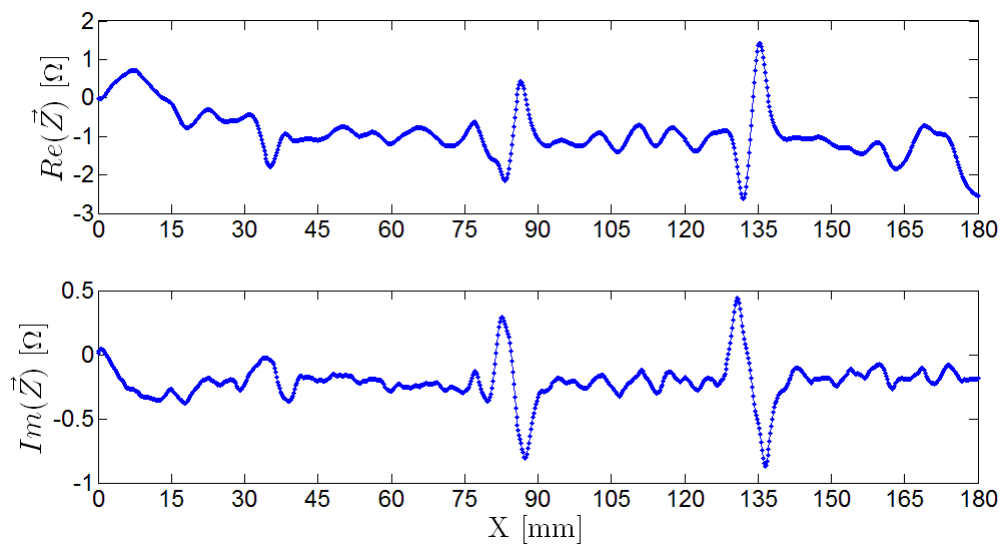


Figura A28 – Ensaio 6 – Abordagem 1 – 250 kHz

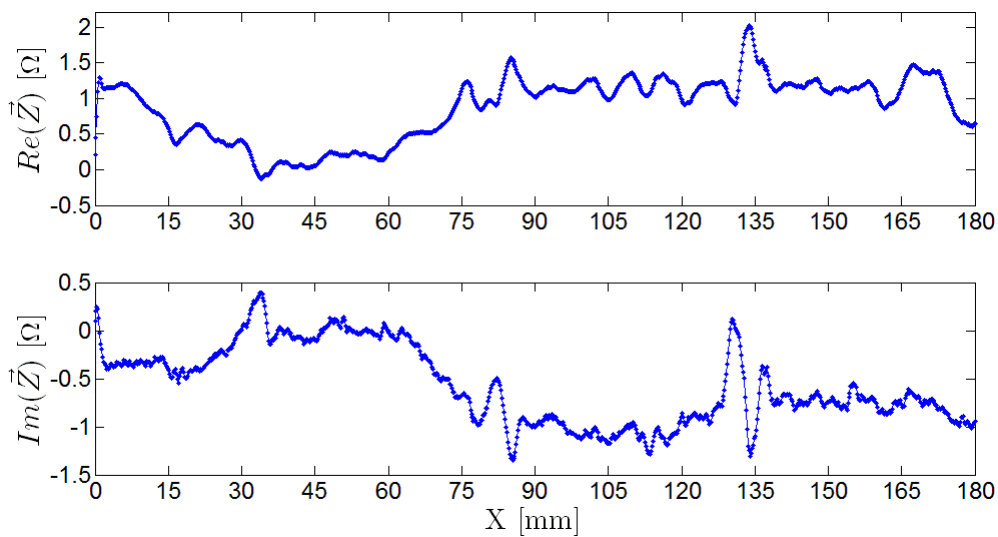


Figura A29 – Ensaio 8 – Abordagem 1 – 2 MHz

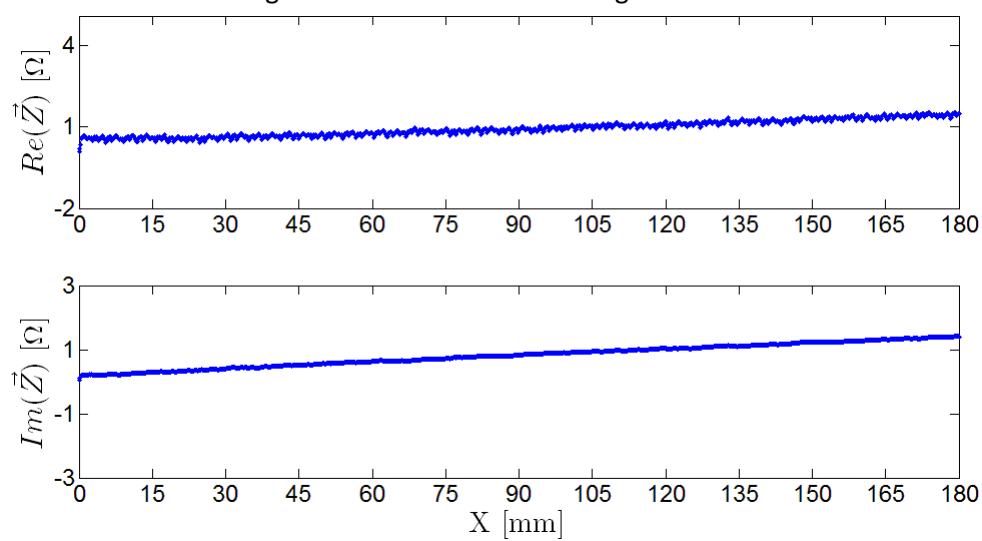


Figura A30 – Ensaio 9 – Abordagem 2 – 200 kHz

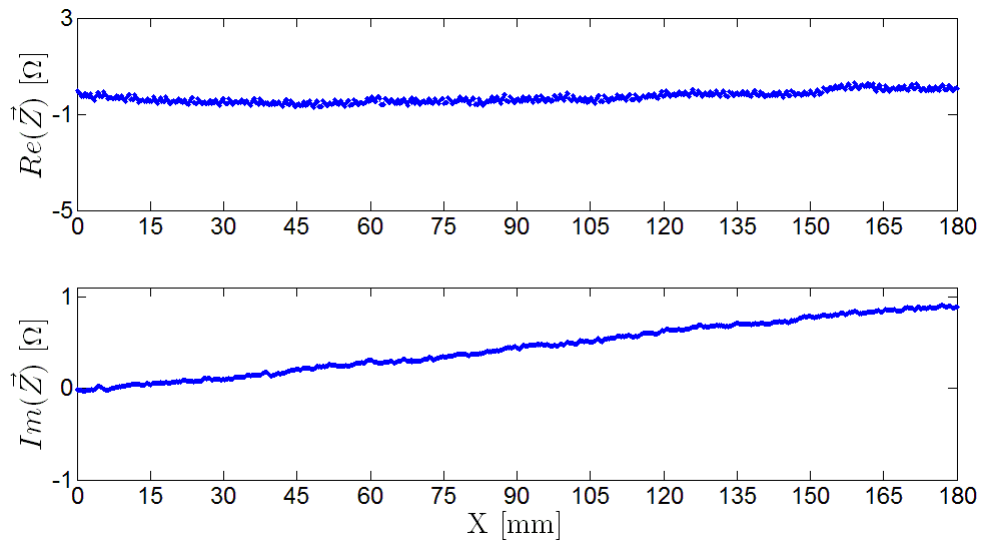


Figura A31 – Ensaio 10 – Abordagem 2 – 100 kHz

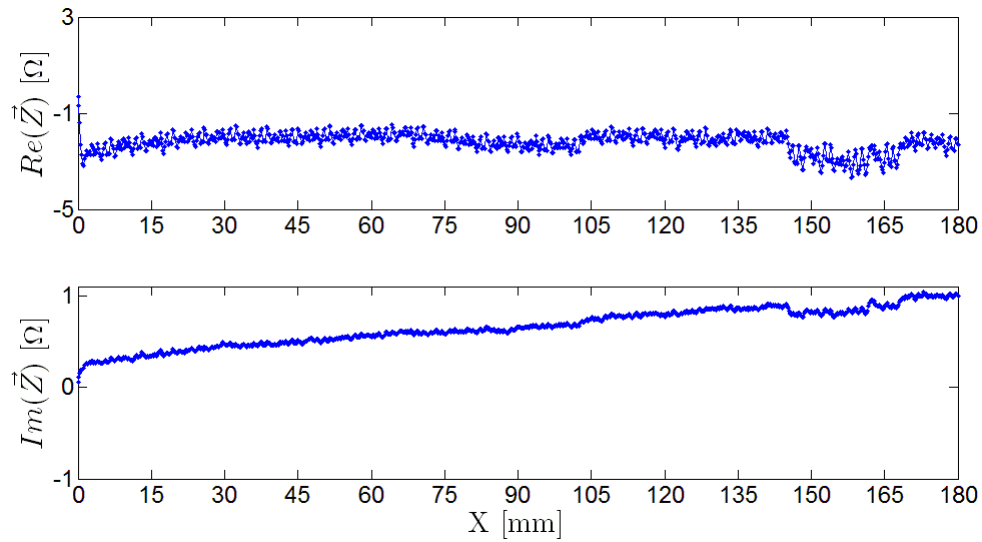


Figura A32 – Ensaio 11 – Abordagem 2 – 100 kHz

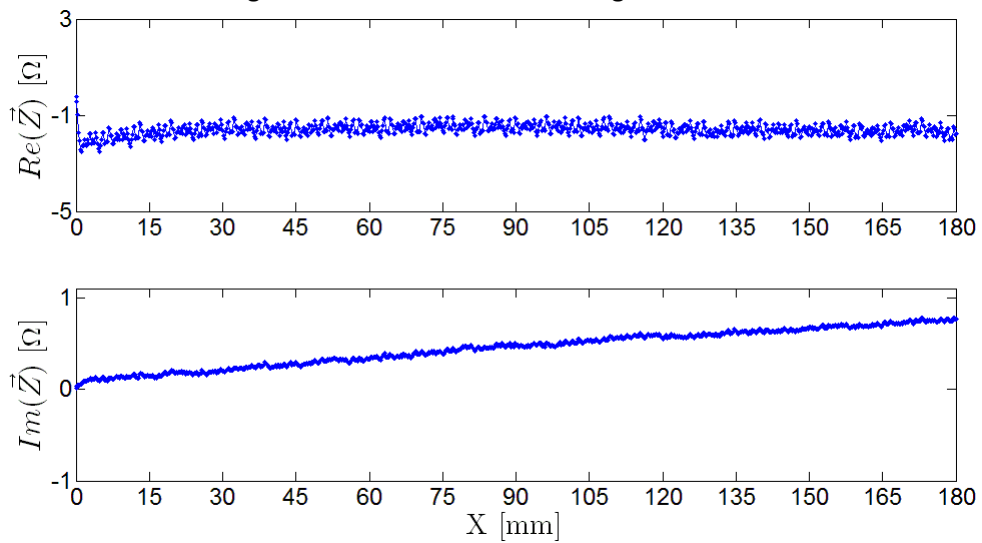


Figura A33 – Ensaio 12 – Abordagem 2 – 100 kHz

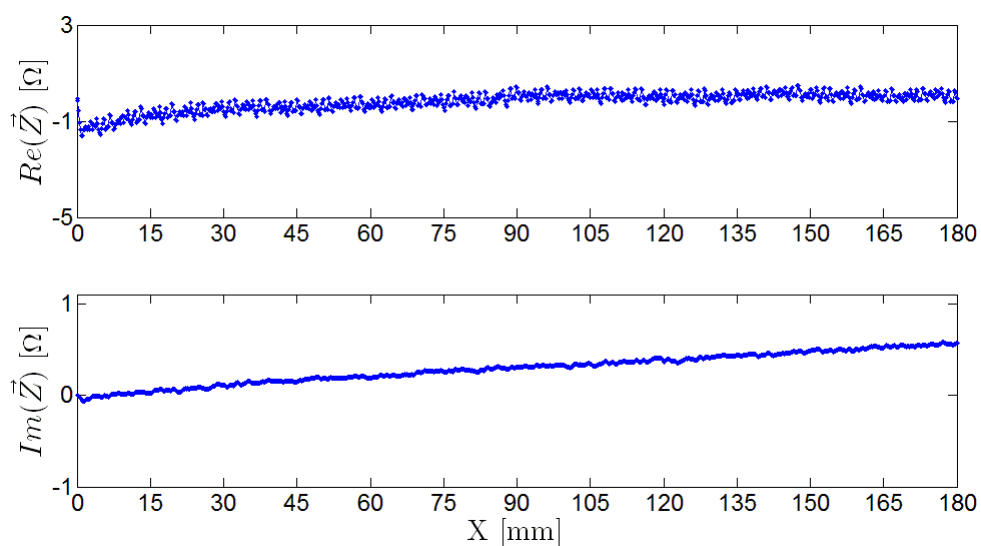


Figura A34 – Ensaio 13 – Abordagem 2 – 100 kHz

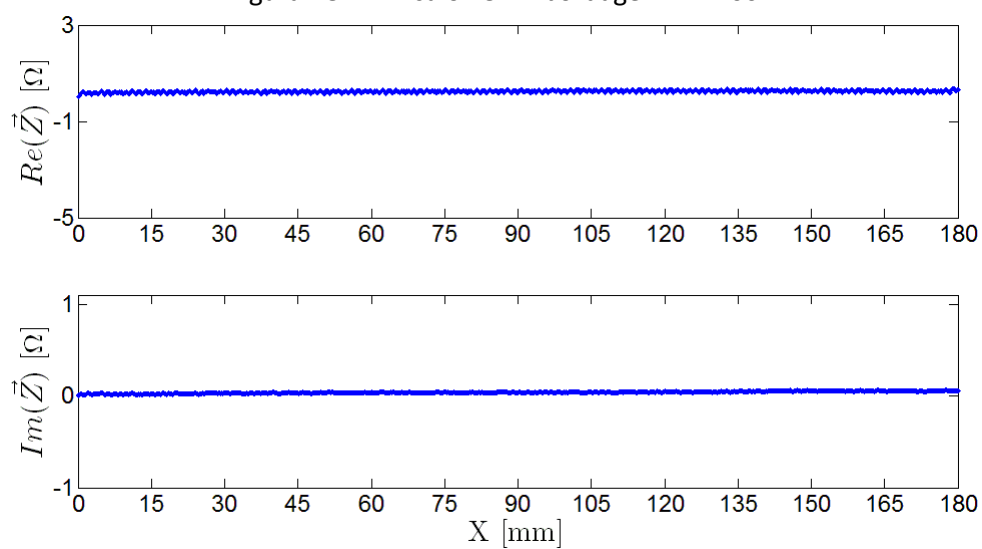


Figura A35 – Ensaio 14 – Abordagem 4 – 100 kHz

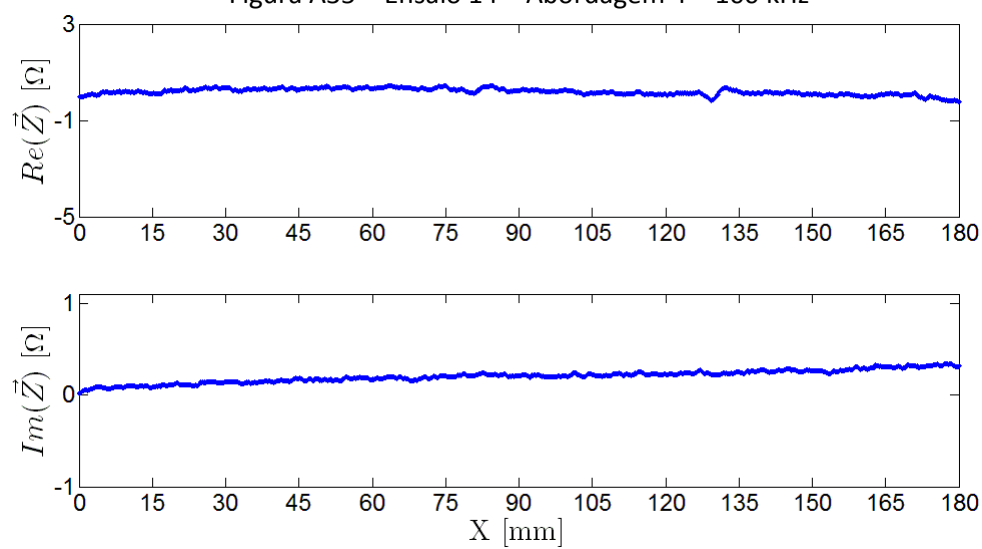


Figura A36 – Ensaio 15 – Abordagem 5 – 100 kHz

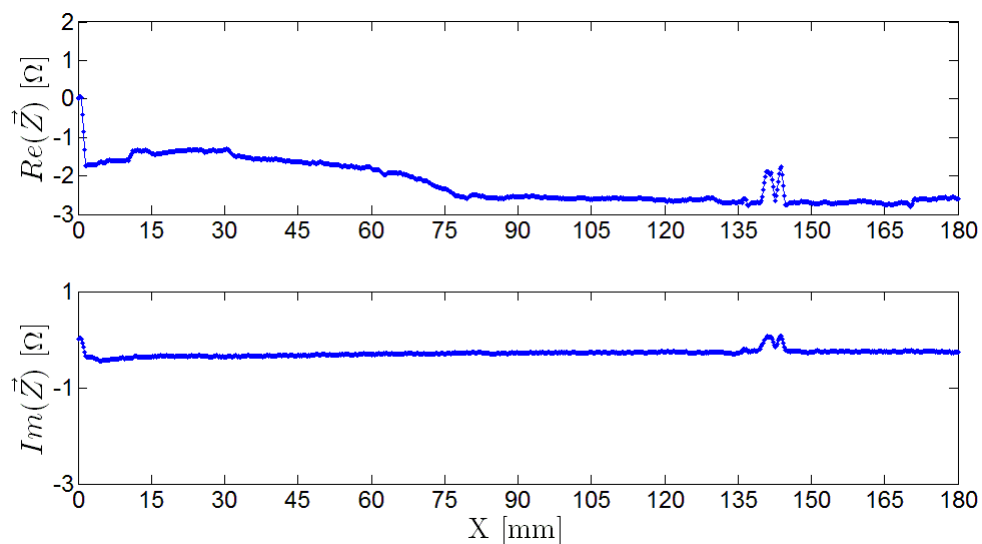


Figura A37 – Ensaio 16 – Abordagem 5 – 300 kHz

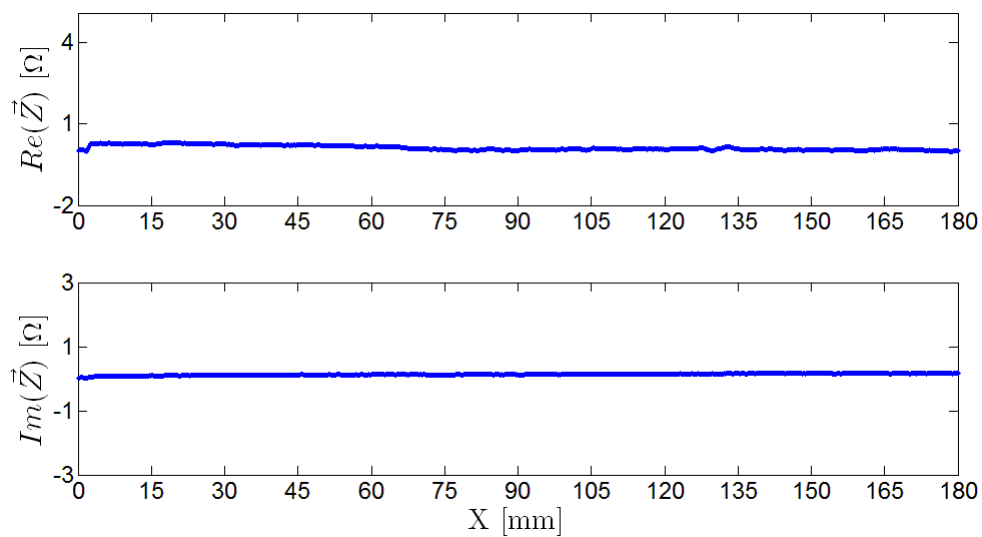


Figura A38 – Ensaio 17 – Abordagem 5 – 200 kHz

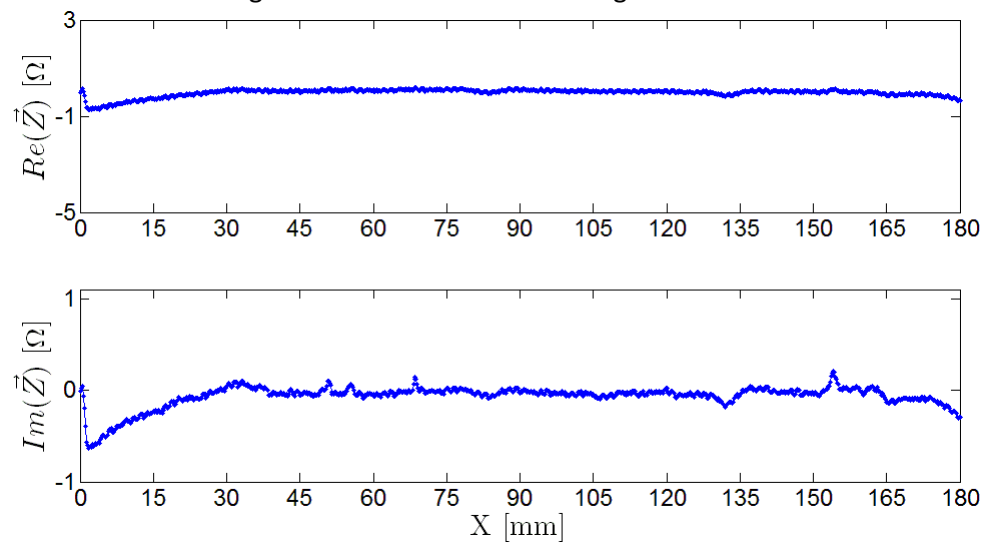


Figura A39 – Ensaio 18 – Abordagem 3 – 100 kHz

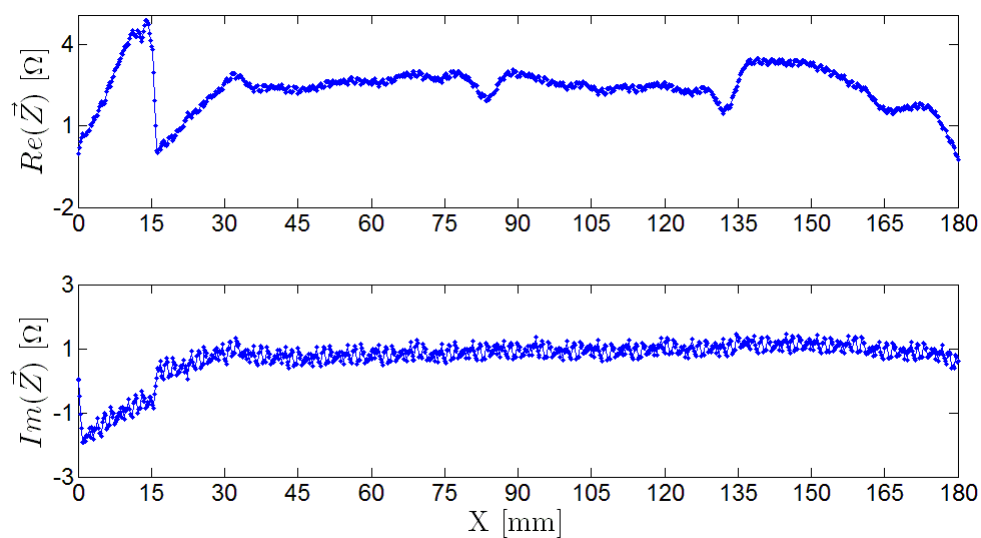


Figura A40 – Ensaio 19 – Abordagem 3 – 200 kHz

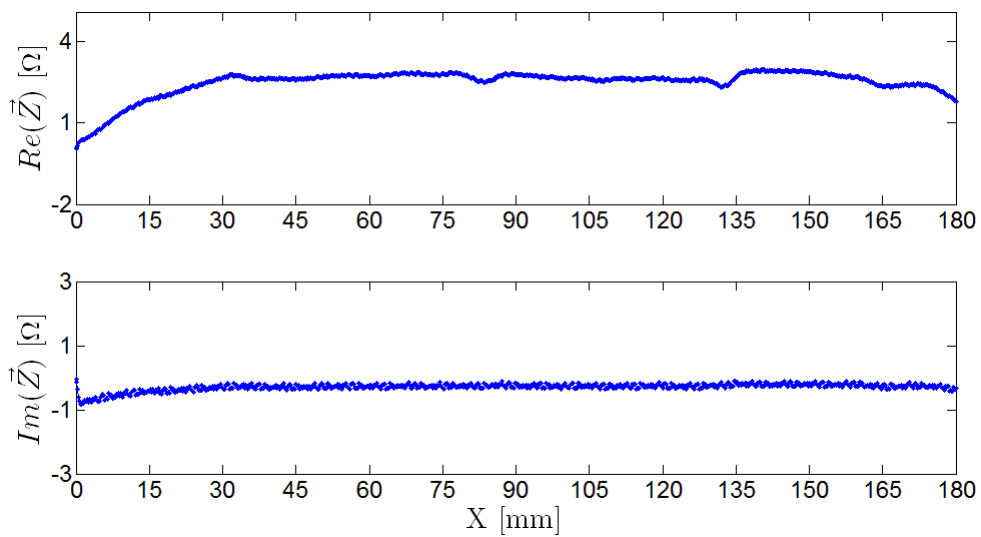


Figura A41 – Ensaio 20 – Abordagem 3 – 200 kHz

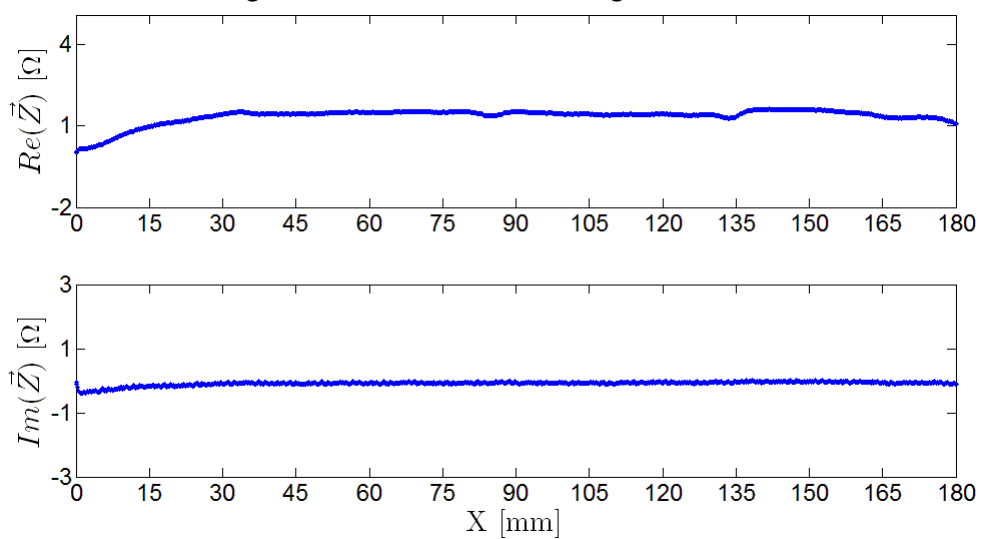


Figura A42 – Ensaio 21 – Abordagem 3 – 200 kHz

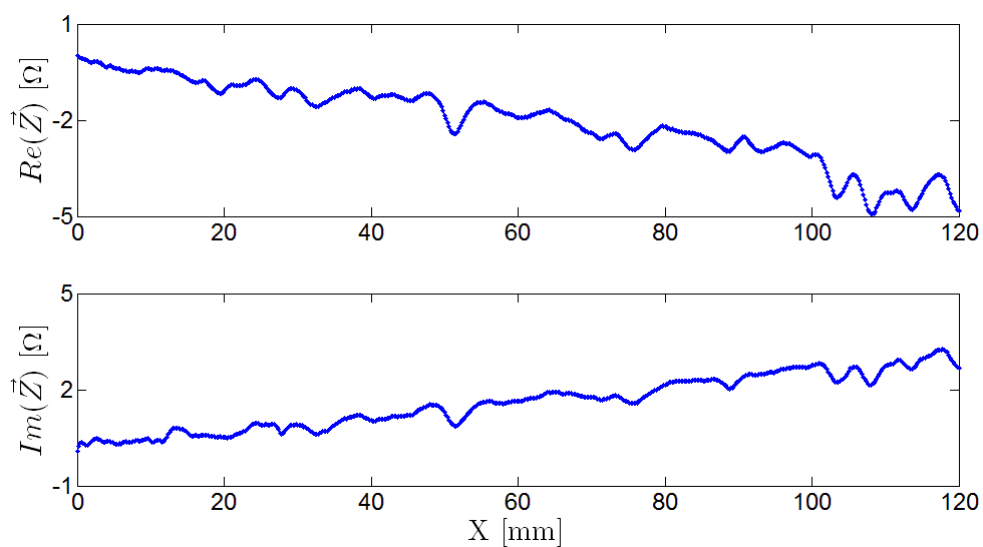


Figura A43 – Ensaio 22 – Abordagem 1 –1 MHz

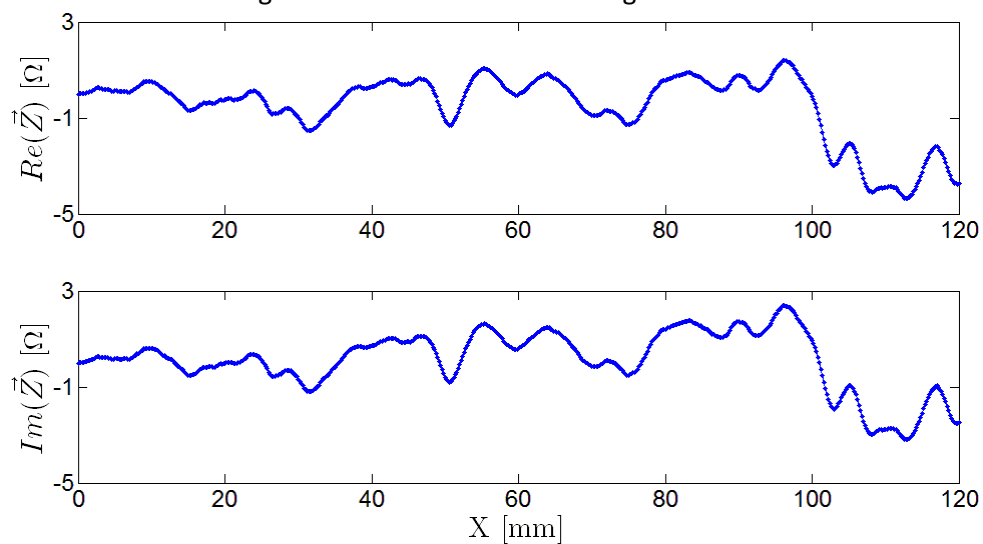


Figura A44 – Ensaio 24 – Abordagem 1 –50 kHz

Anexo 8 – Resultado ensaio com sonda convencional

Tabela A6 – Parâmetros dos ensaios realizados para a abordagem 1

Ensaio	Frequência (kHz)	Ganho (dB)	Drive	Tubo	Figura
1	900	75	MID	Tubo ITER	Figura 6.13
2	1500	75	MID	Tubo ITER	Figura A45
3	2000	75	MID	Tubo ITER	Figura A46
4	2000	75	LOW	Tubo ITER	Figura A47
5	3000	75	LOW	Tubo ITER	Figura 6.14
6	4000	75	LOW	Tubo ITER	Figura A48
7	5000	75	LOW	Tubo ITER	Figura A49
8	5000	75	MID	Tubo ITER	Figura A50
9	750	75	MID	Tubo ITER	Figura A51
10	500	75	MID	Tubo ITER	Figura A52
11	300	75	MID	Tubo ITER	Figura 6.12
12	150	75	MID	Tubo ITER	Figura A53
13	150	75	HIGH	Tubo ITER	Figura A54
14	1000	50	MID	Aço ST 52	Figura A55
15	500	60	MID	Aço ST 52	Figura 6.16
16	250	60	MID	Aço ST 52	Figura A56
17	50	70	MID	Aço ST 52	Figura A57

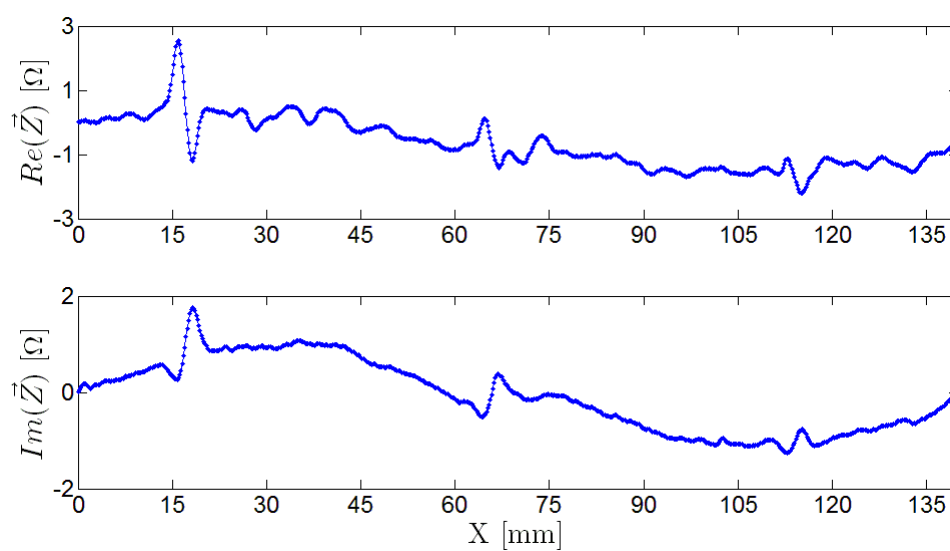


Figura A45 – Ensaio 2 – Abordagem 1 – 1.5 MHz

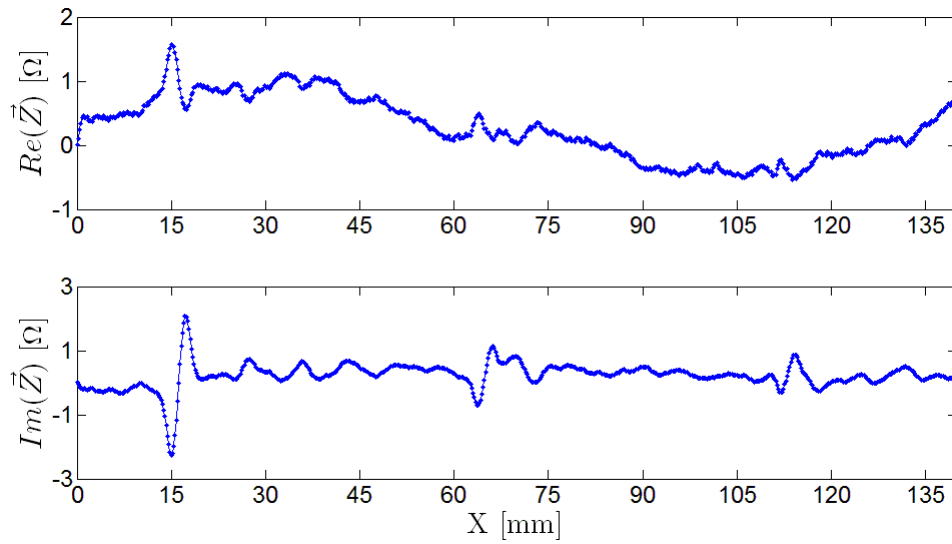


Figura A46 – Ensaio 3 – Abordagem 1 – 2 MHz

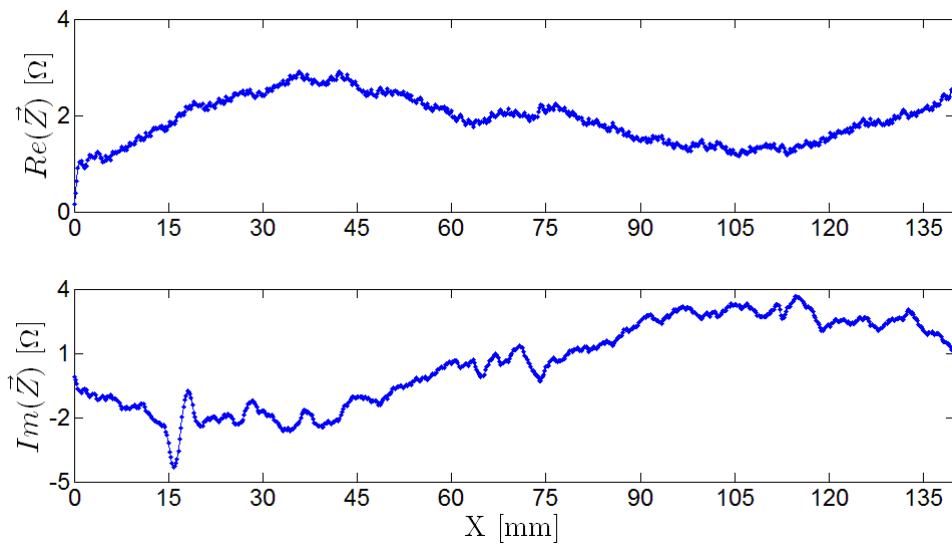


Figura A47 – Ensaio 4 – Abordagem 1 – 2 MHz

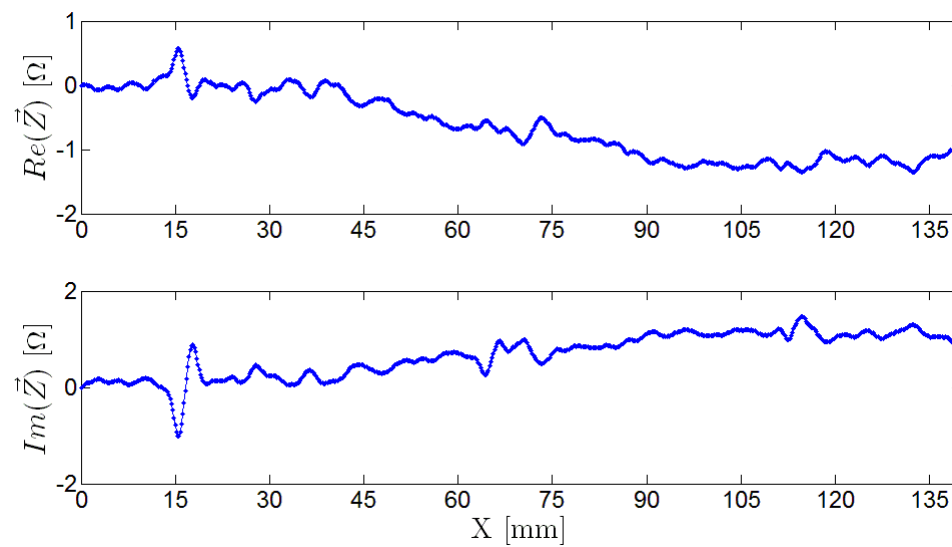


Figura A48 – Ensaio 6 – Abordagem 1 – 4 MHz

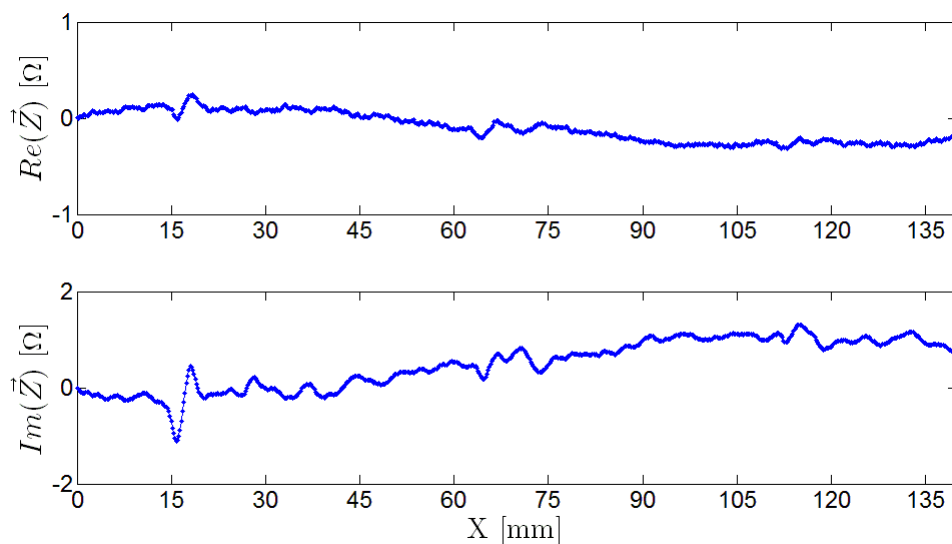


Figura A49 – Ensaio 7 – Abordagem 1 – 5 MHz

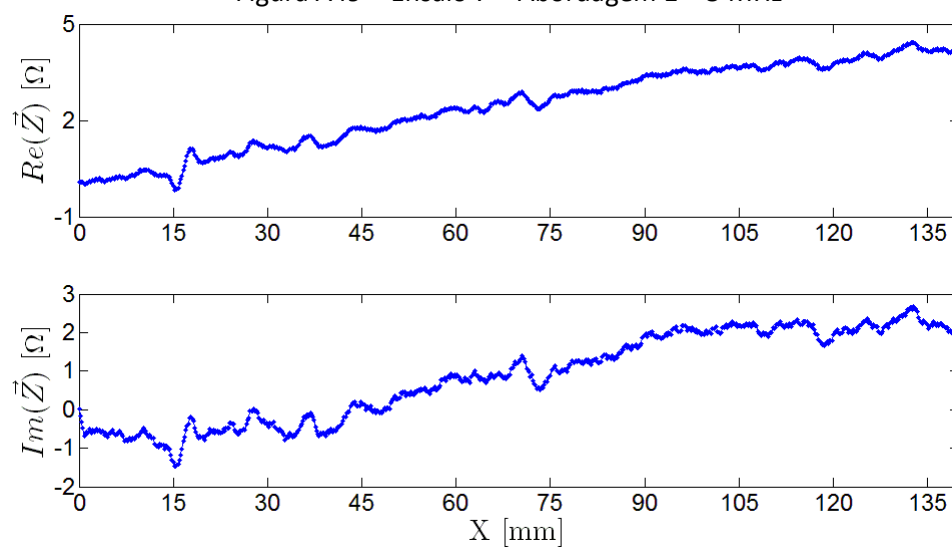


Figura A50 – Ensaio 8 – Abordagem 1 – 5 MHz

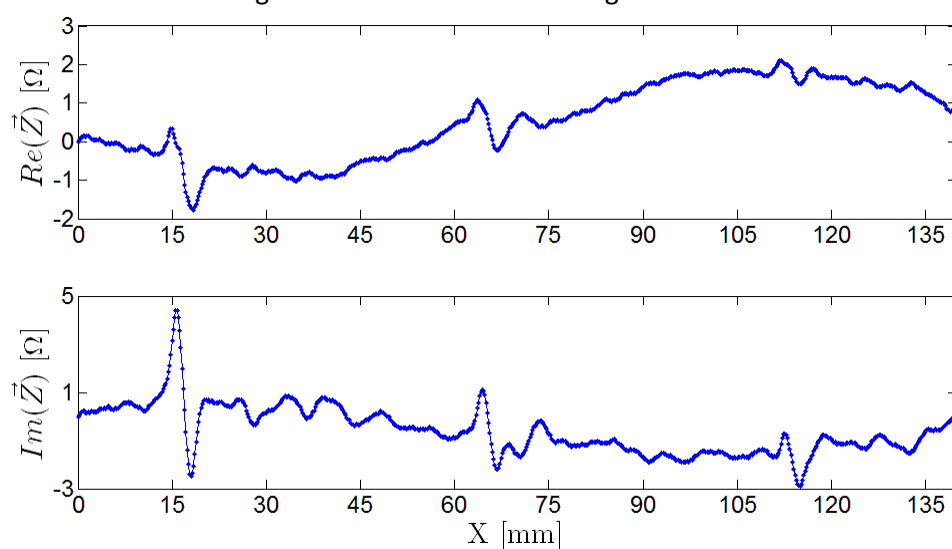


Figura A51 – Ensaio 9 – Abordagem 1 – 750 kHz

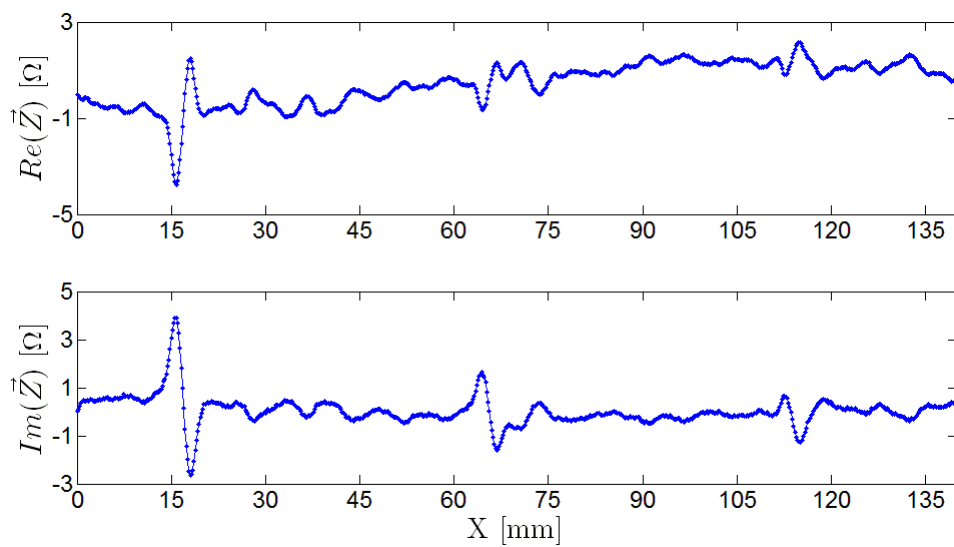


Figura A52 – Ensaio 10 – Abordagem 1 – 500 kHz

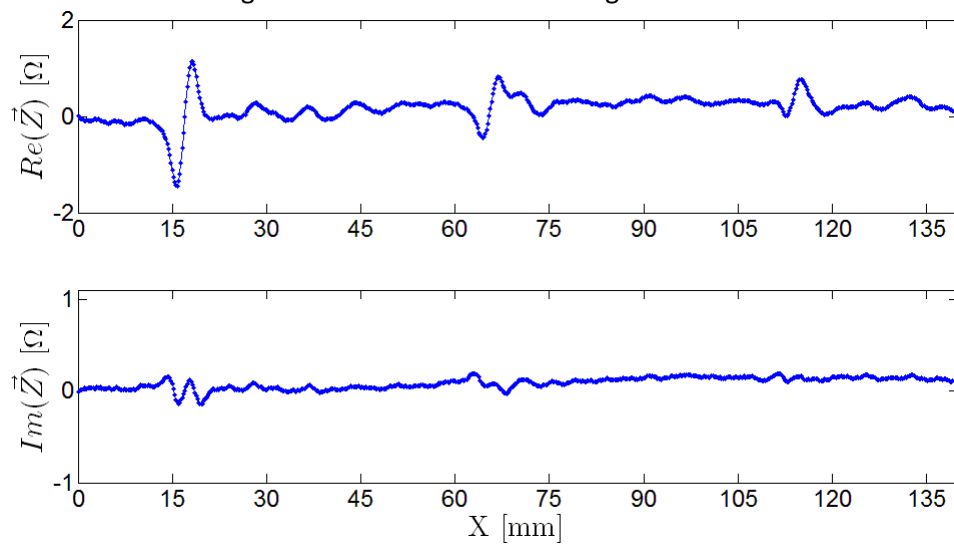


Figura A53 – Ensaio 12 – Abordagem 1 – 150 kHz

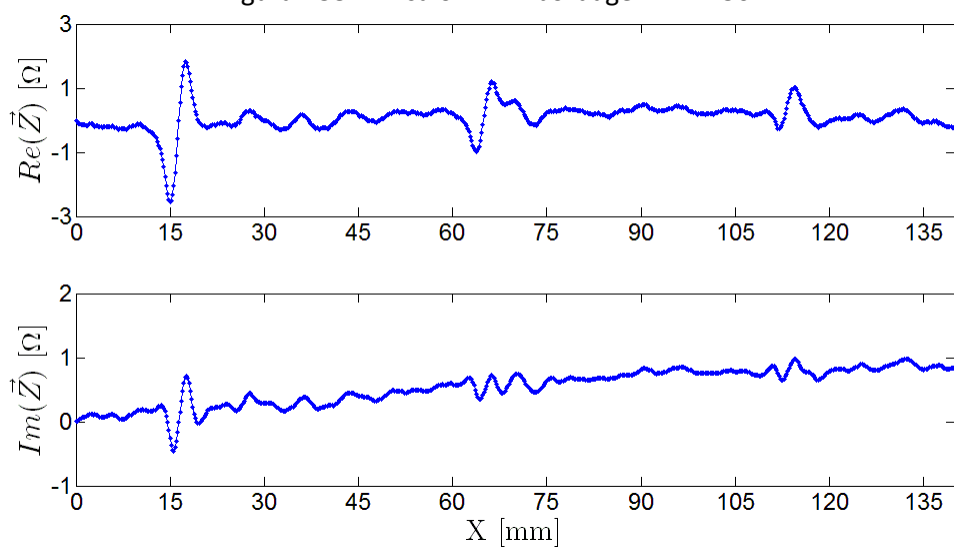


Figura A54 – Ensaio 13 – Abordagem 1 – 150 kHz

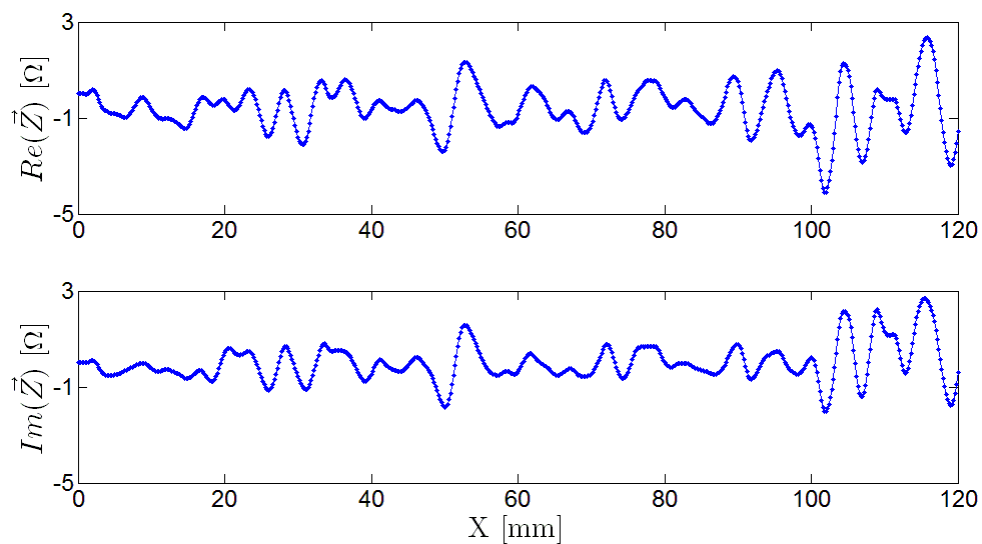


Figura A55 – Ensaio 14 – Abordagem 1 – 1 MHz

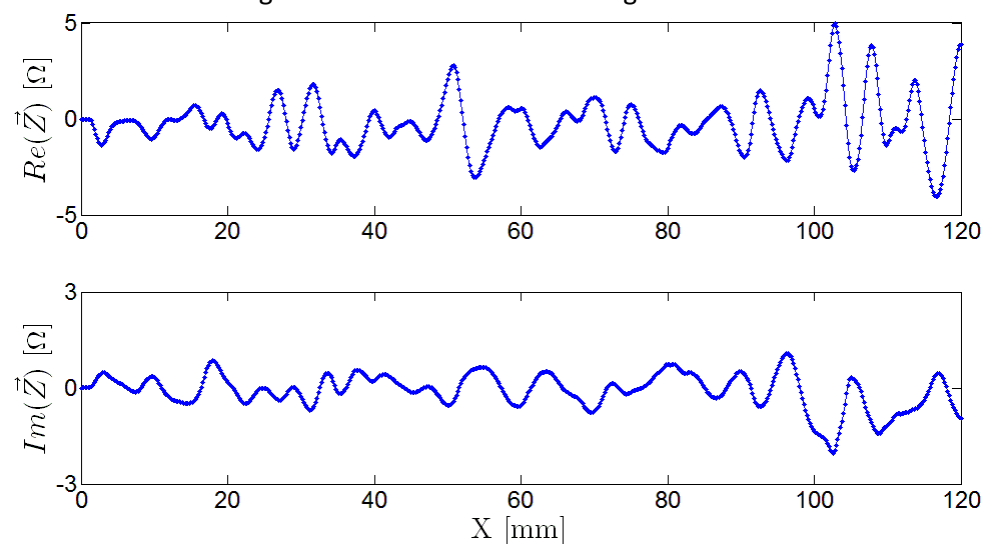


Figura A56 – Ensaio 16 – Abordagem 1 – 250 kHz

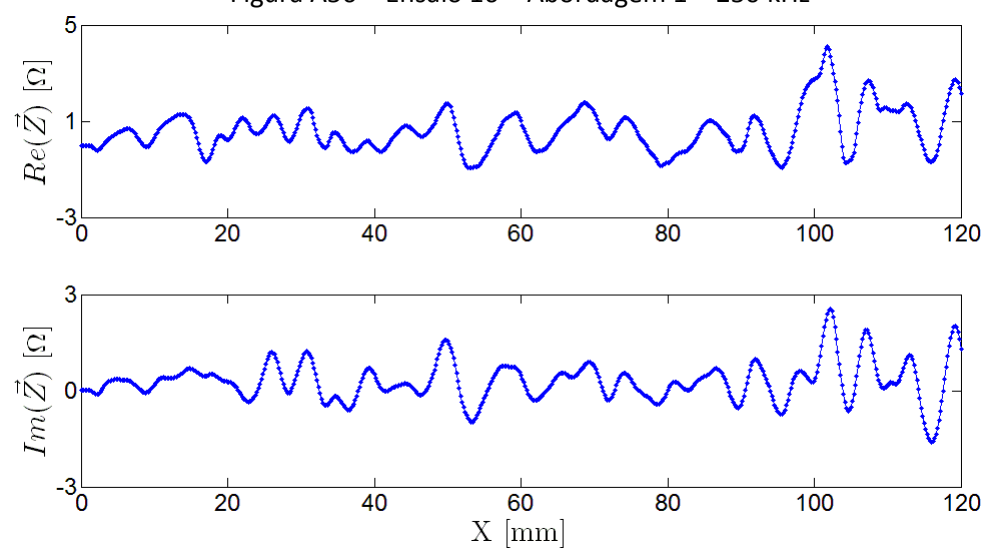


Figura A57 – Ensaio 17 – Abordagem 1 – 50 kHz

Tabela A7 – Parâmetros dos ensaios realizados para a abordagem 2

Ensaio	Frequência (kHz)	Ganho (dB)	Drive	Figura
1	900	75	MID	Figura 6.15
2	1500	75	MID	Figura A58
3	2000	75	MID	Figura A59
4	3000	75	MID	Figura A60
5	3000	75	LOW	Figura A61
6	4000	75	LOW	Figura A62
7	750	75	MID	Figura A63
8	500	75	MID	Figura A64

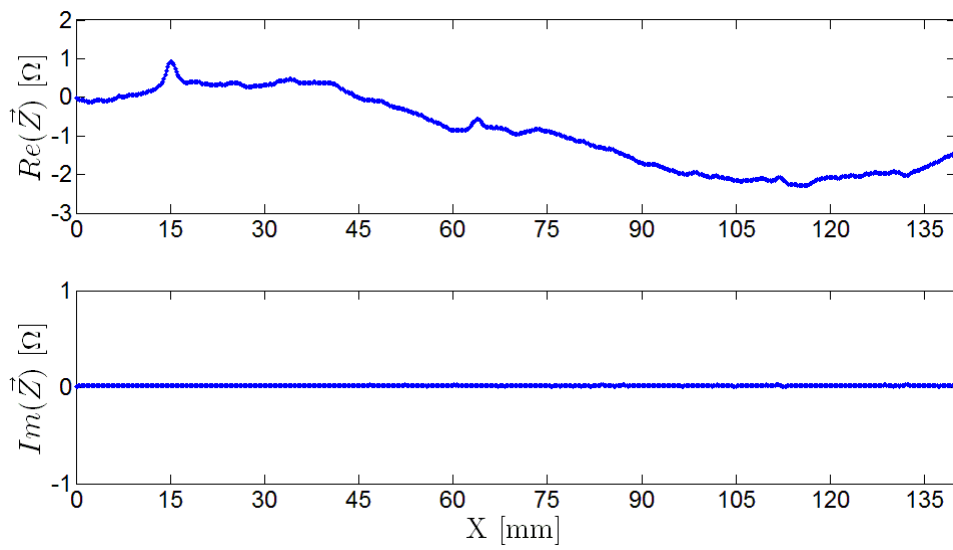


Figura A58 – Ensaio 2 – Abordagem 2 – 1.5 MHz

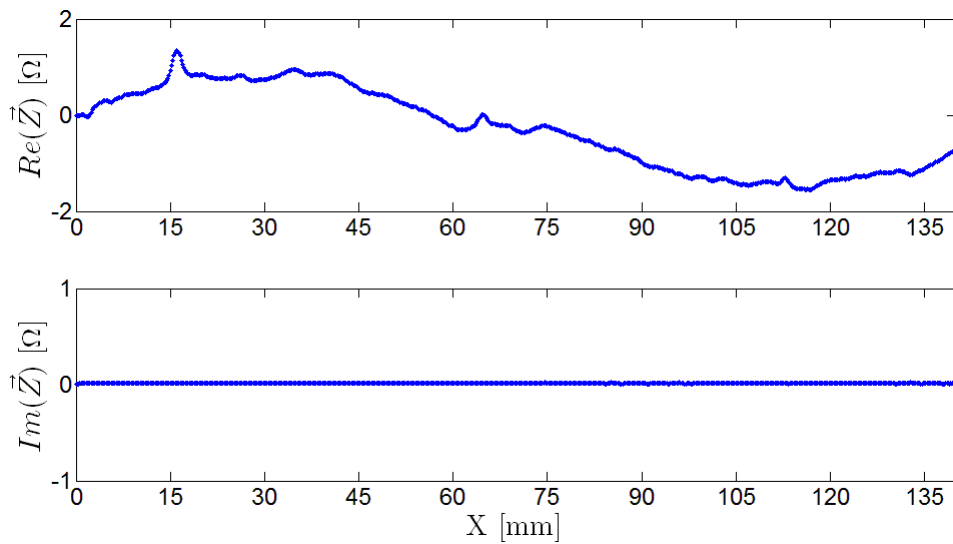


Figura A59 – Ensaio 3 – Abordagem 2 – 2 MHz

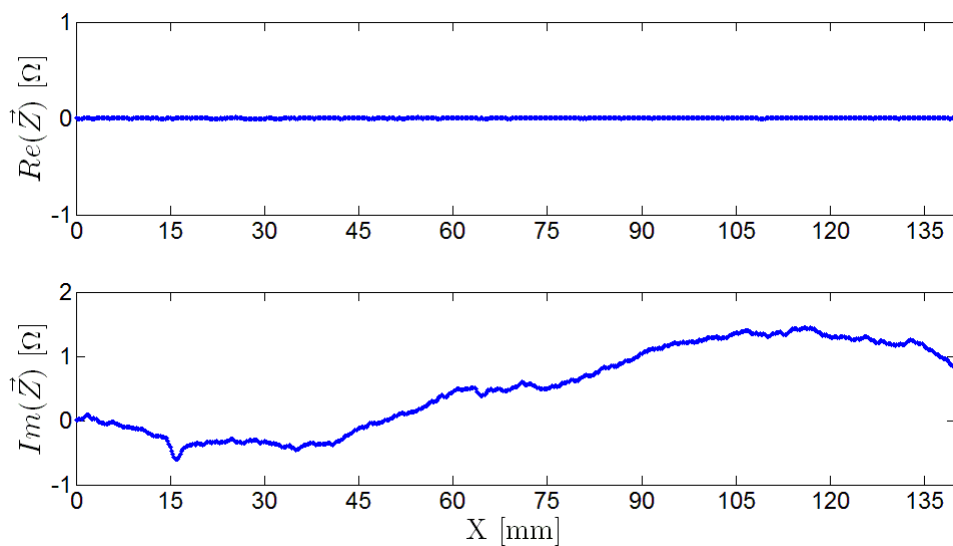


Figura A60 – Ensaio 4 – Abordagem 2 – 3 MHz

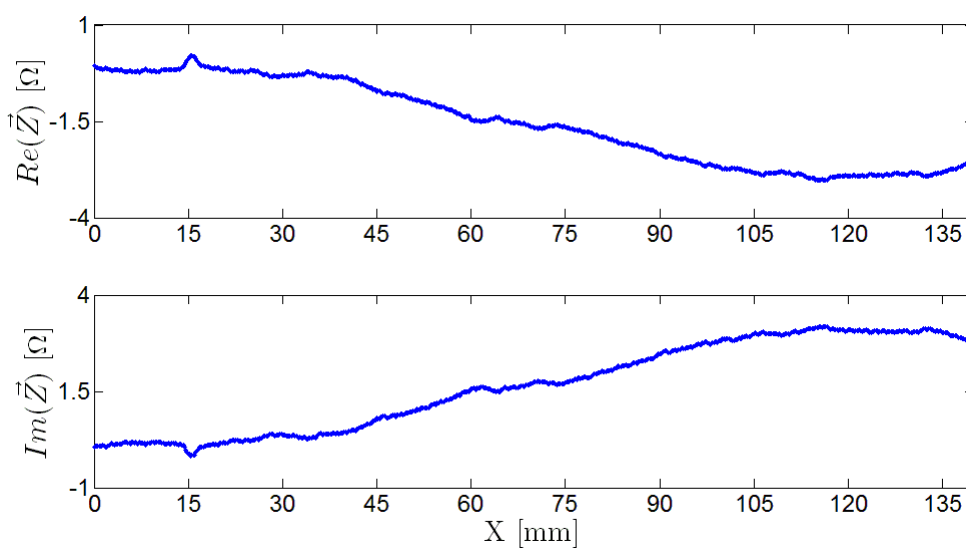


Figura A61 – Ensaio 5 – Abordagem 2 – 3 MHz

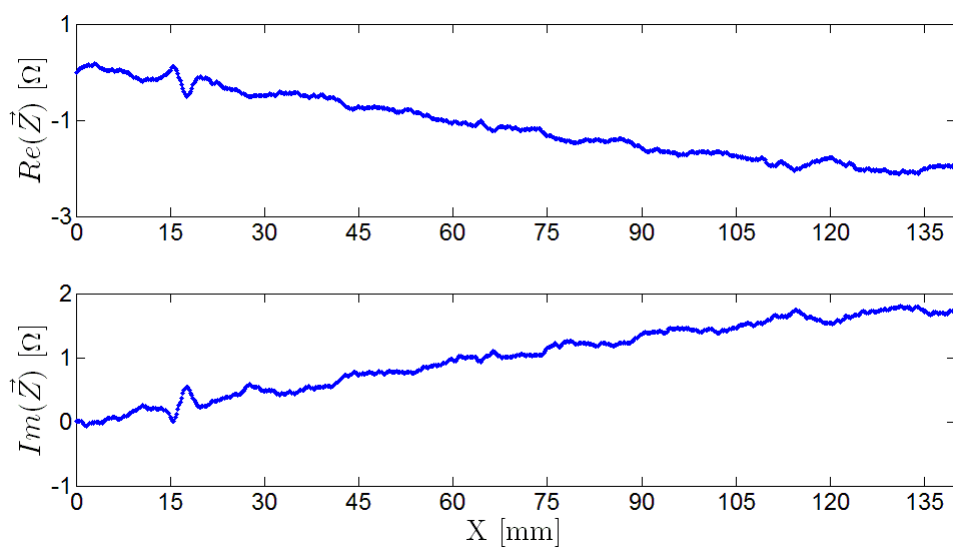


Figura A62 – Ensaio 6 – Abordagem 2 – 4 MHz

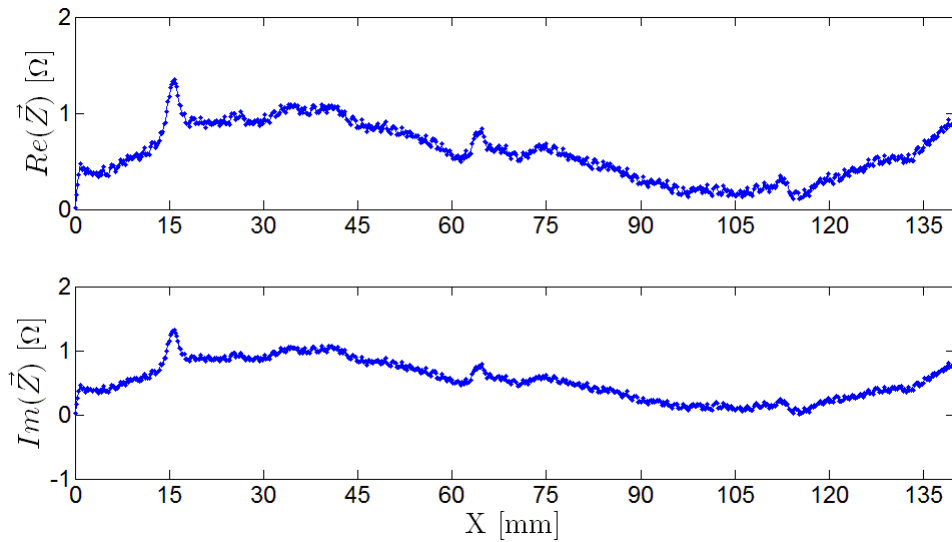


Figura A63 – Ensaio 7 – Abordagem 2 – 750 kHz

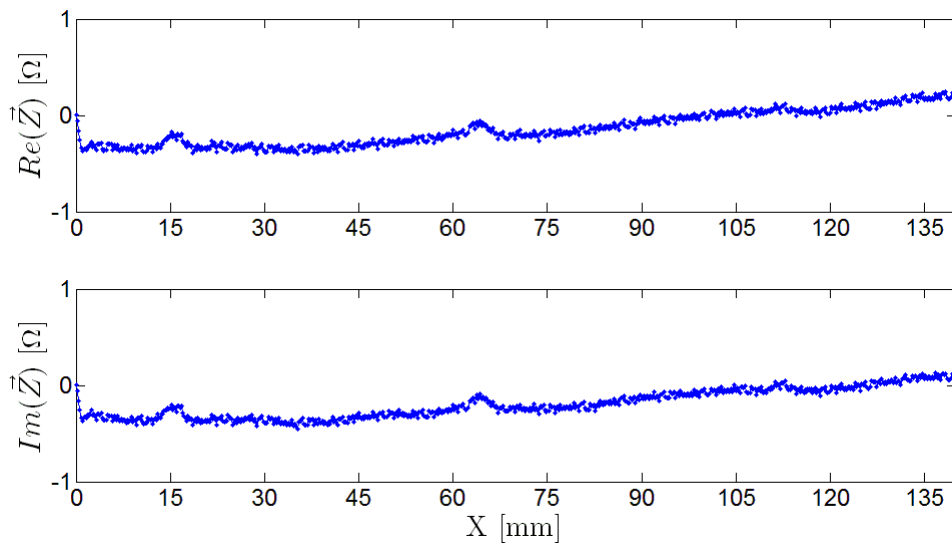


Figura A64 – Ensaio 8 – Abordagem 2 – 500 kHz

Tabela A8 – Parâmetros dos ensaios realizados para a abordagem 3

Ensaio	Frequência (kHz)	Ganho (dB)	Drive	Figura	Notas
1	900	75	MID	Figura A65	
2	2000	75	MID	Figura A66	
3	500	75	MID	Figura A67	
4	500	75	LOW	Figura A68	Drivers chantados
5	500	60	MID	Figura A69	Drivers chantados SNS com GND
6	500	75	LOW	Figura A70	Drivers chantados 2xSNS com GND
7	200	75	LOW	Figura A71	Drivers chantados 2xSNS com GND

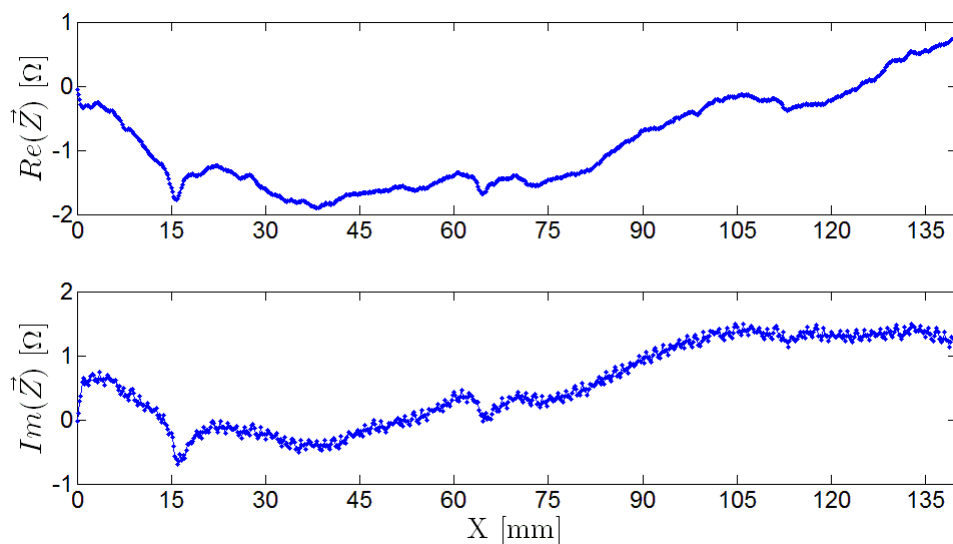


Figura A65 – Ensaio 1 – Abordagem 3 – 900 kHz

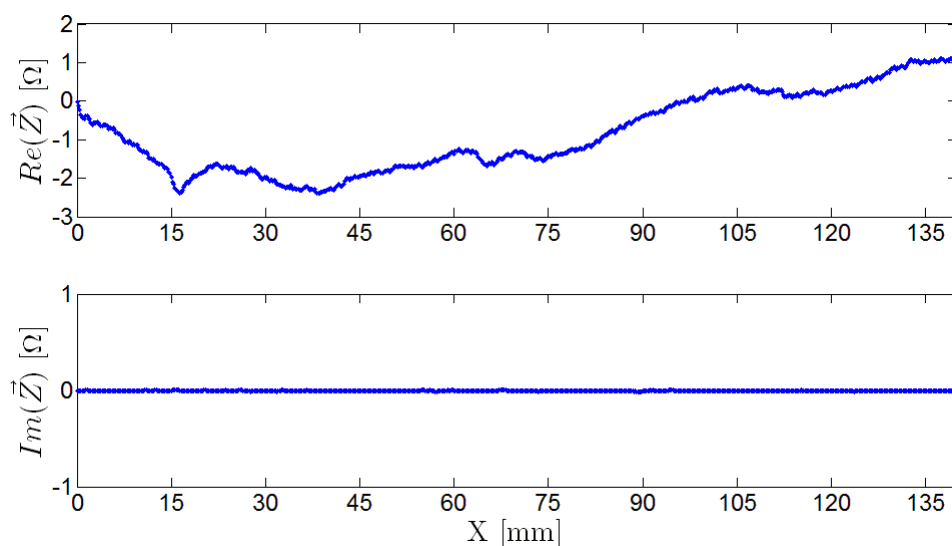


Figura A66 – Ensaio 2 – Abordagem 3 – 2 MHz

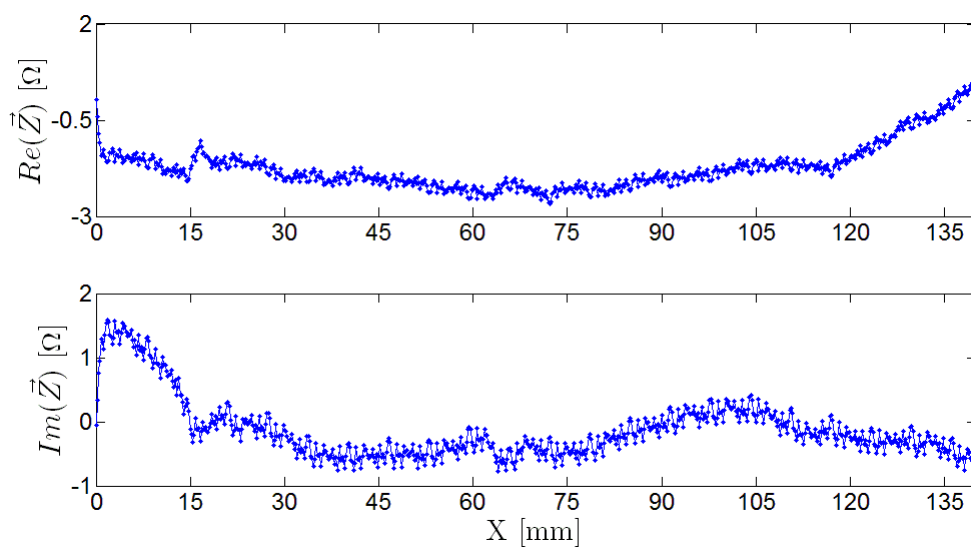


Figura A67 – Ensaio 3 – Abordagem 3 – 500 kHz

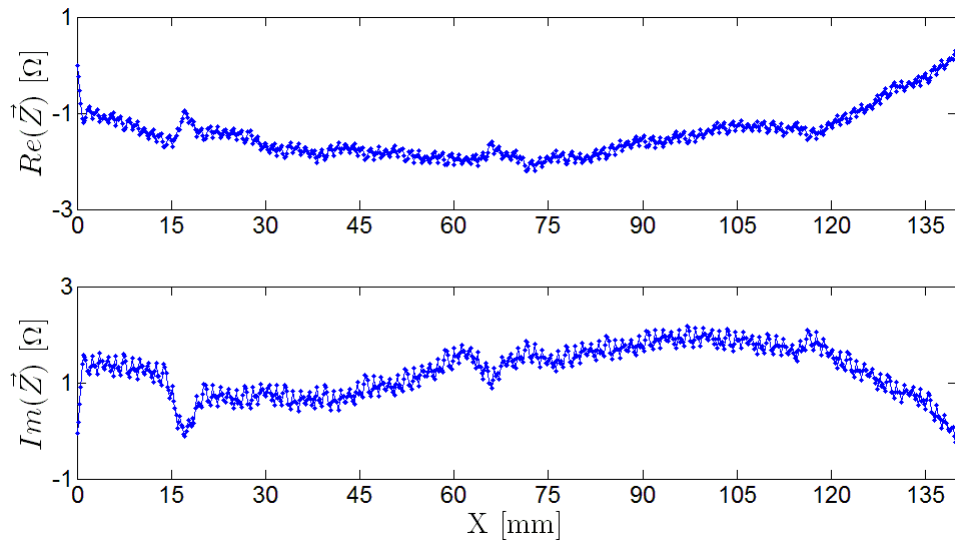


Figura A68 – Ensaio 4 – Abordagem 3 – 500 kHz

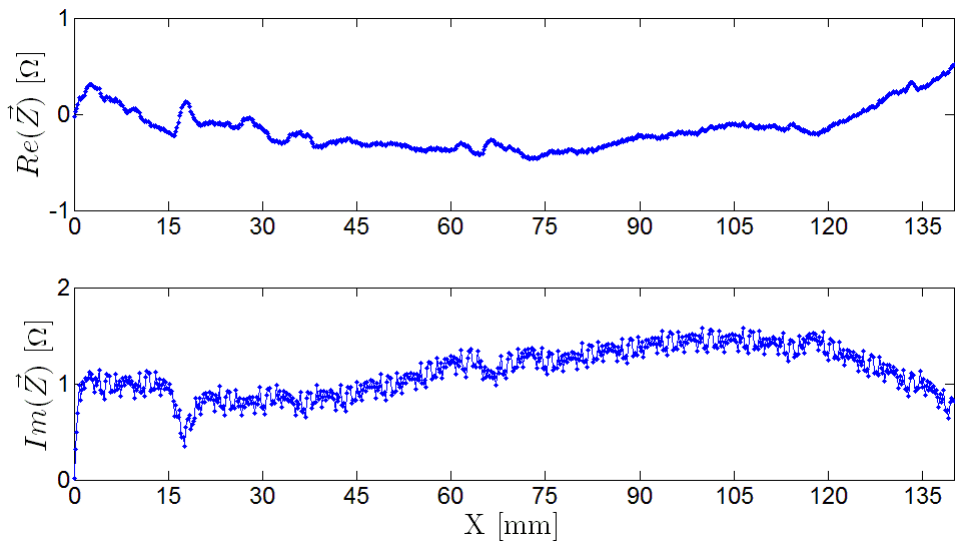


Figura A69 – Ensaio 5 – Abordagem 3 – 500 kHz

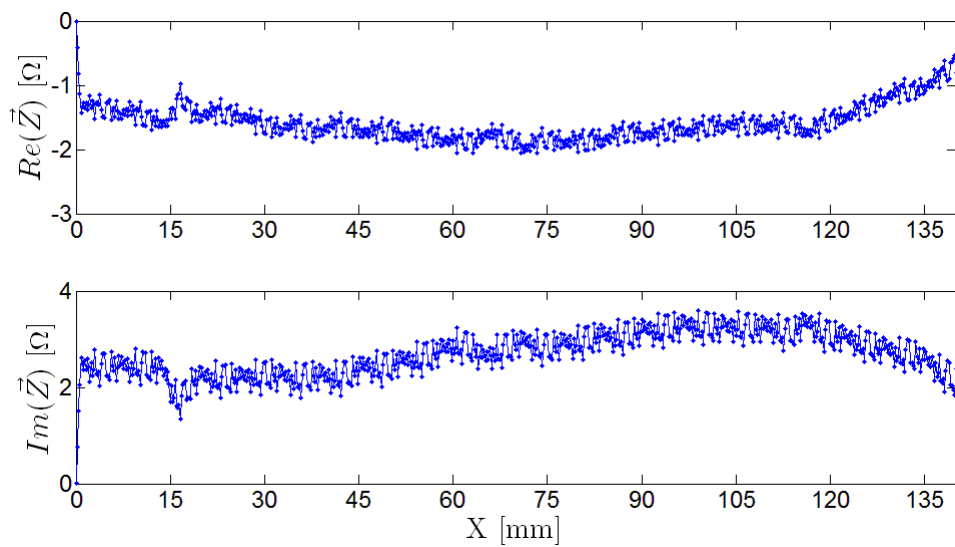


Figura A70 – Ensaio 6 – Abordagem 3 – 500 kHz

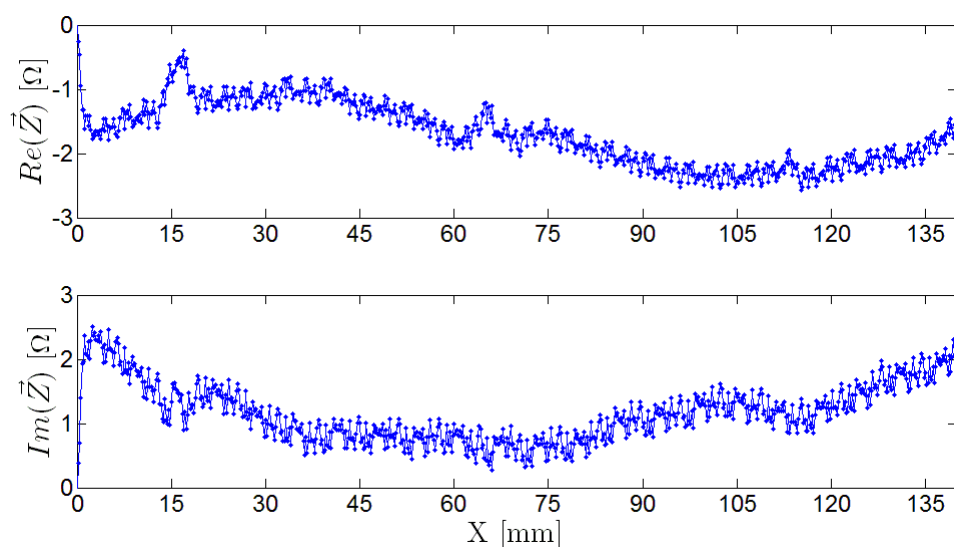


Figura A71 – Ensaio 7 – Abordagem 3 – 200 kHz

Tabela A9 – Parâmetros dos ensaios realizados para a abordagem 4

Ensaio	Frequência (kHz)	Ganho (dB)	Drive	Figura
1	250	75	MID	Figura A72
2	500	75	MID	Figura A73

Outras frequências mais altas saturava

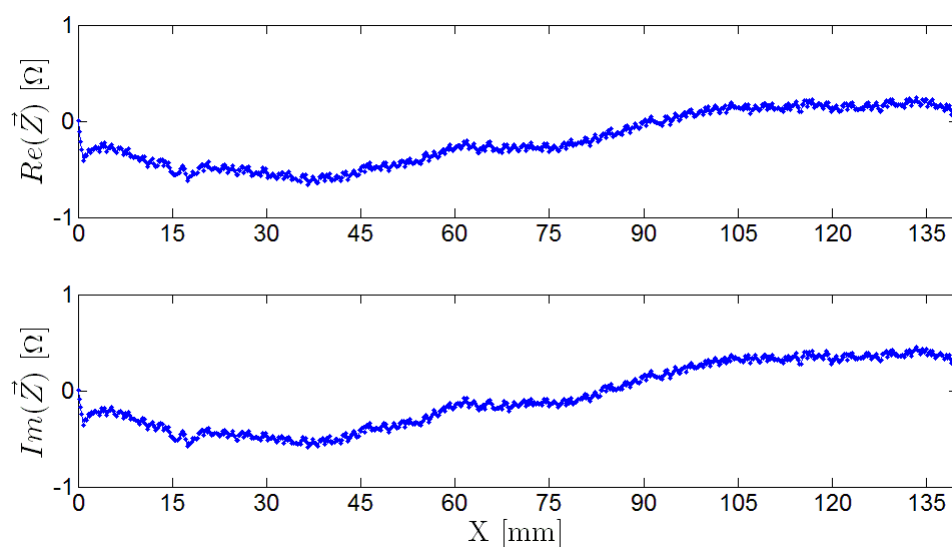


Figura A72 – Ensaio 1 – Abordagem 4 – 250 kHz

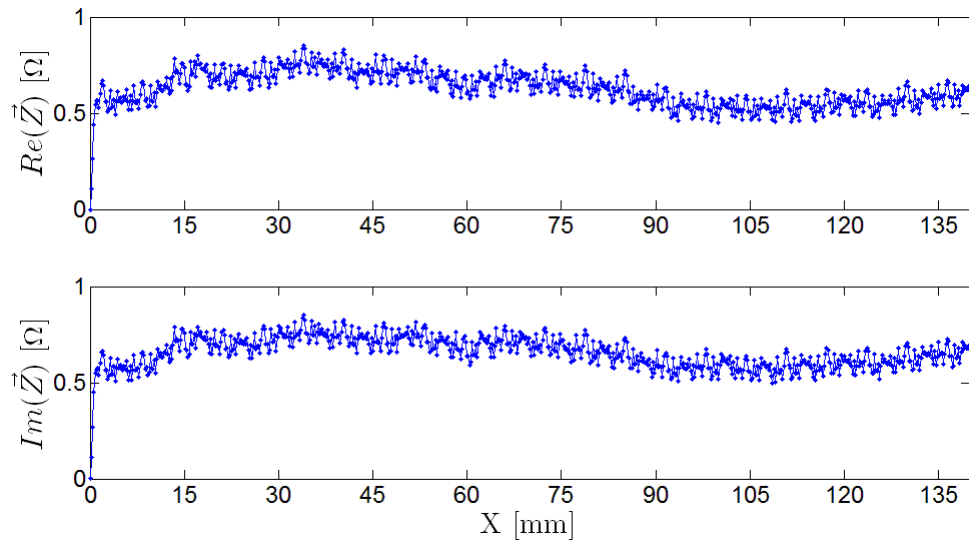


Figura A73 – Ensaio 2 – Abordagem 4 – 500 kHz

Tabela A10 – Parâmetros dos ensaios realizados para a abordagem 5a

Ensaio	Frequência (kHz)	Ganho (dB)	Drive	Figura
1	500	75	MID	Figura A74
2	500	85	LOW	Figura A75
3	500	85	MID	Figura A76
4	250	85	MID	Figura A77

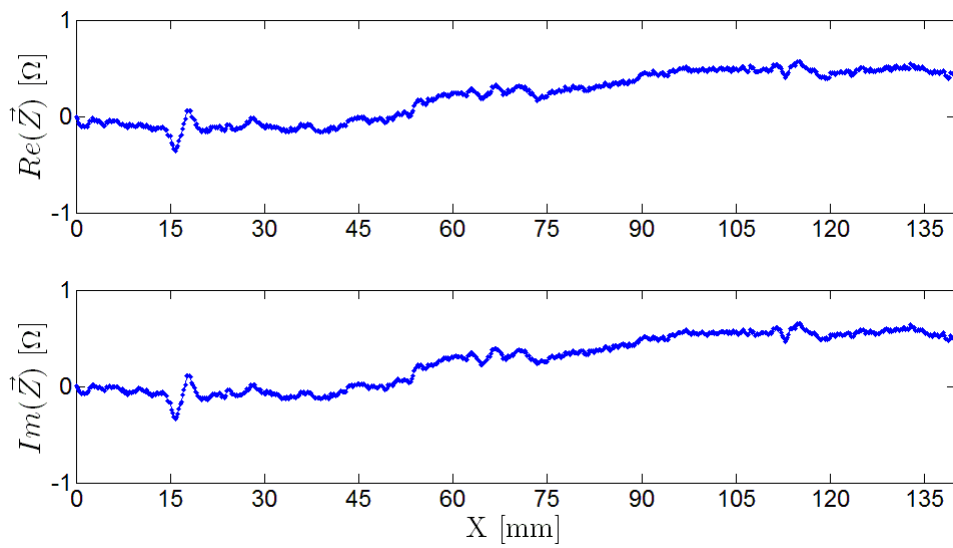


Figura A74 – Ensaio 1 – Abordagem 5a – 500 kHz

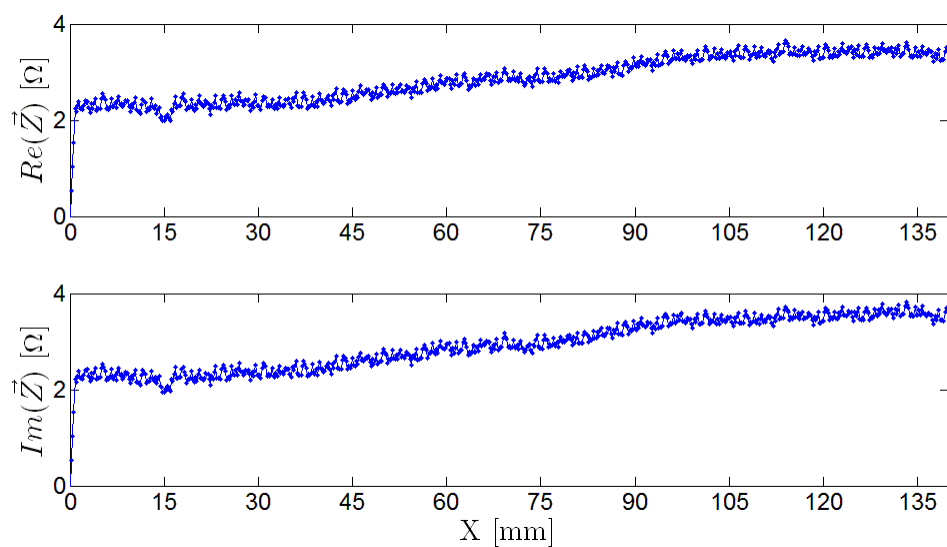


Figura A75 – Ensaio 2 – Abordagem 5a – 500 kHz

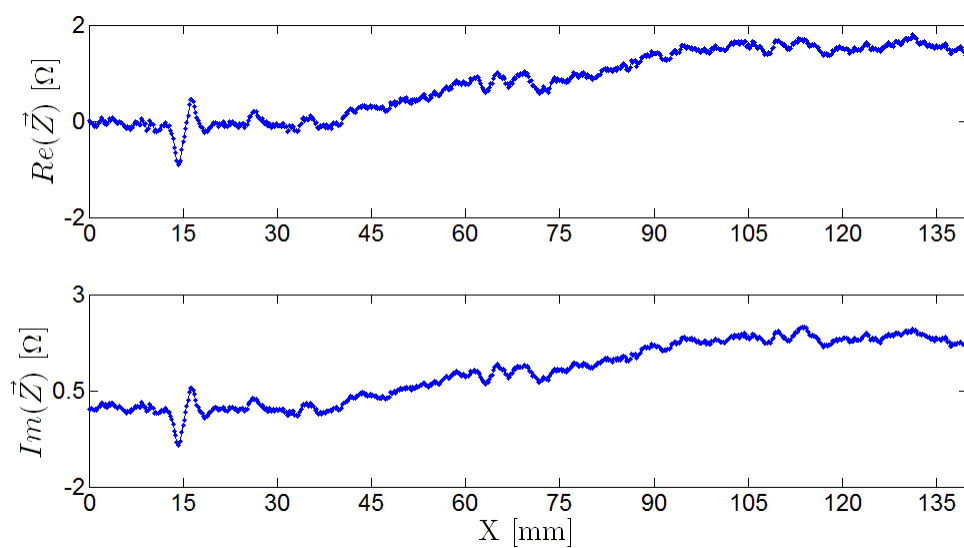


Figura A76 – Ensaio 3 – Abordagem 5a – 500 kHz

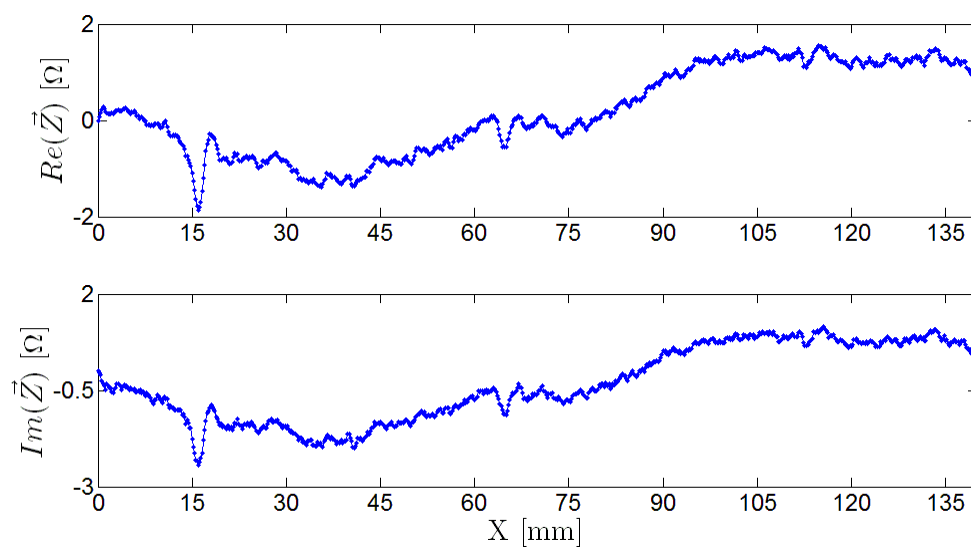


Figura A77 – Ensaio 4 – Abordagem 5a – 250 kHz

Ensaio	Frequência (kHz)	Ganho (dB)	Drive	Figura
1	250	85	MID	Figura A78
2	500	80	MID	Figura A79
3	1000	75	HIGH	Figura A80
4	3000	70	HIGH	Figura A81
5	3000	70	MID	Figura A82

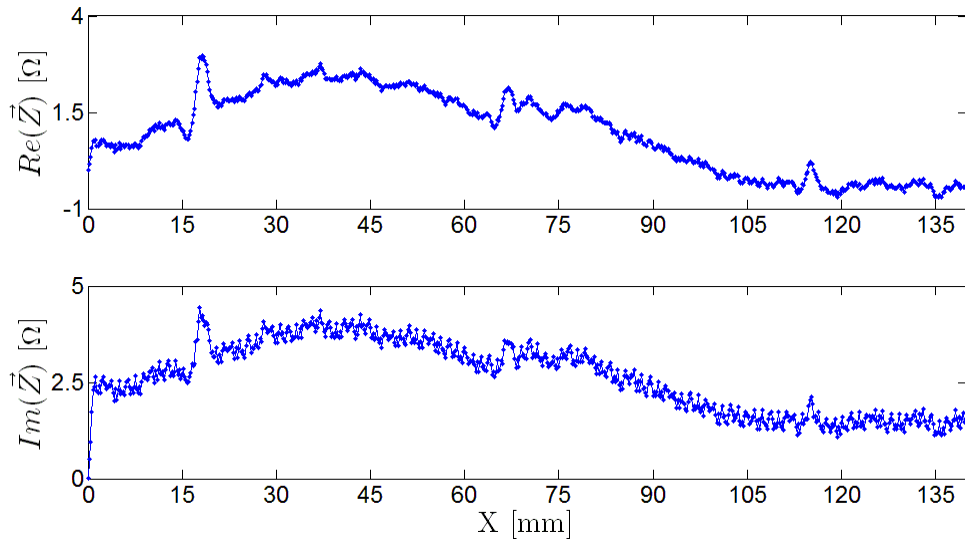


Figura A78 – Ensaio 1 – Abordagem 5b – 250 kHz

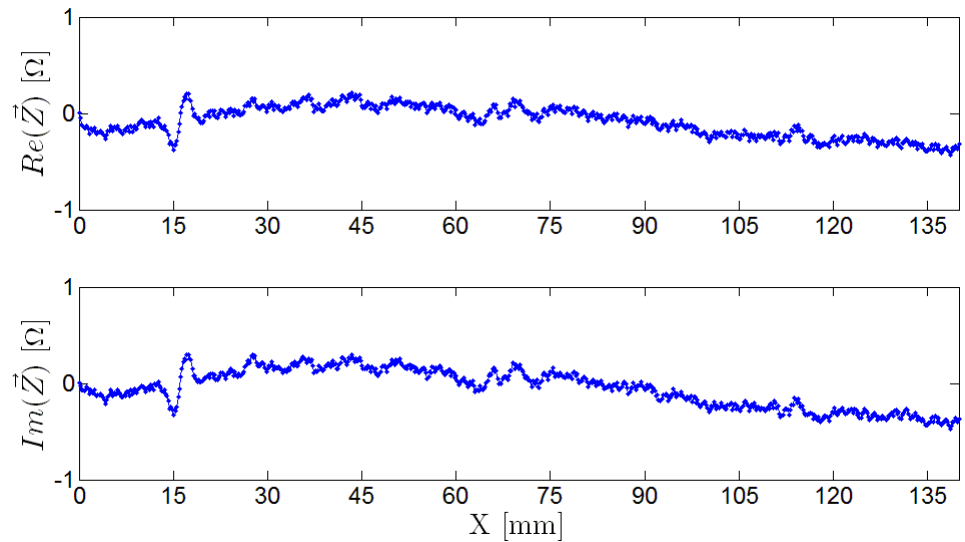


Figura A79 – Ensaio 2 – Abordagem 5b – 500 kHz

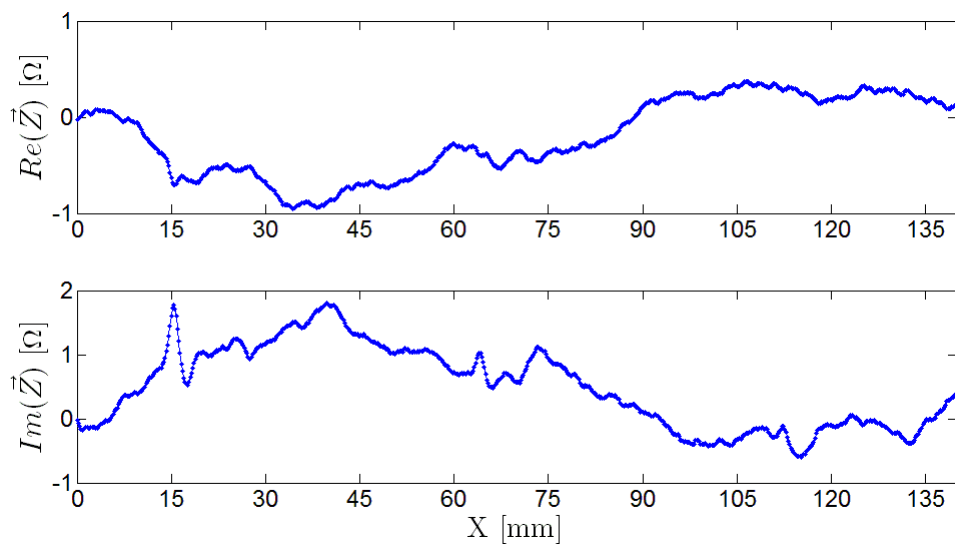


Figura A80 – Ensaio 3 – Abordagem 5b – 1 MHz

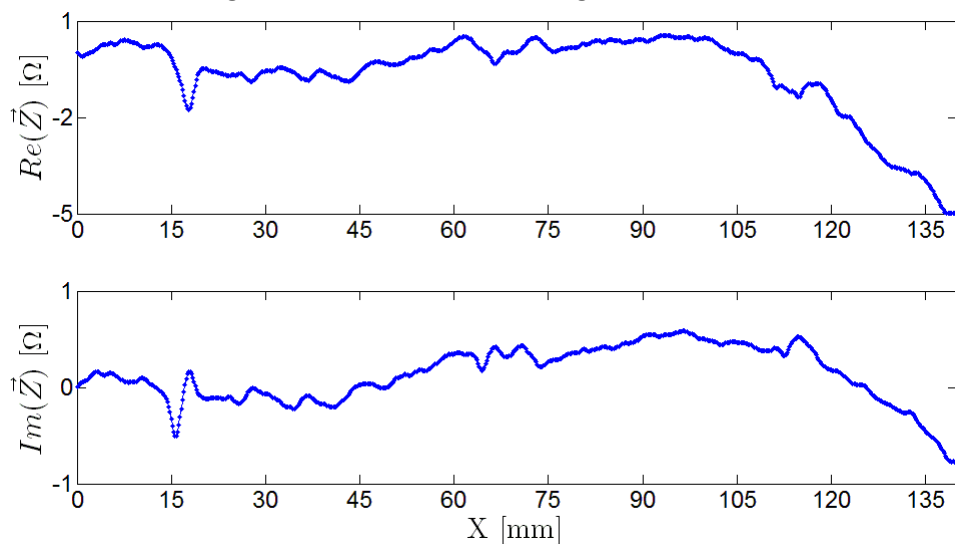


Figura A81 – Ensaio 4 – Abordagem 5b – 3 MHz

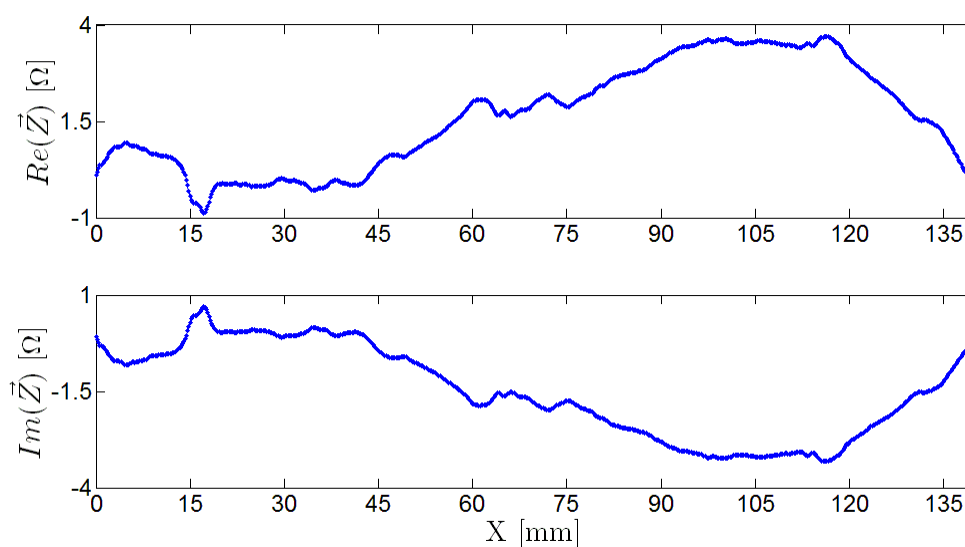


Figura A82 – Ensaio 5 – Abordagem 5b – 3 MHz

Anexo 9 – Resultado sonda três enrolamentos

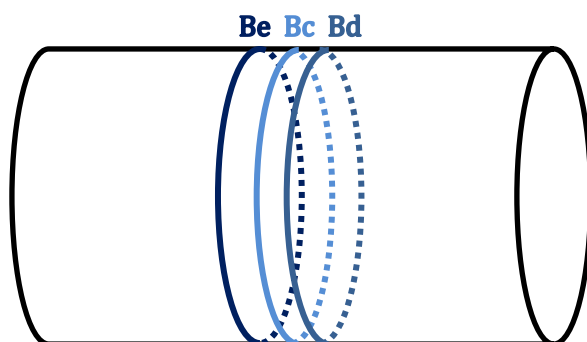


Figura A83 – Esquema da sonda com três enrolamentos

Tabela A12 – Parâmetros dos ensaios realizados para a sonda com três enrolamentos					
Ensaio	Frequência (kHz)	Ganho (dB)	Tubo	Notas	Figura
1	250	85	ITER	Excitação - Bc Leitura dif. - Be e Bd c/ GND	
2	250	85	ITER	Excitação - Bc Leitura dif. - Be e Bd s/ GND	
3	500	80	ITER	Excitação - Bc Leitura dif. - Be e Bd c/ GND	Figura 6.17
4	750	75	ITER	Excitação - Bc Leitura dif. - Be e Bd c/ GND	Figura A84
5	1000	75	ITER	Excitação - Bc Leitura dif. - Be e Bd c/ GND	Figura A85
6	2500	75	ITER	Excitação - Bc Leitura dif. - Be e Bd c/ GND	Figura A86
7	250	85	ITER	Excitação - Bc Leitura n/ dif. - Be e Bd c/ GND	Figura A87
8	250	85	ITER	Excitação - Bd Leitura n/ dif. - Be e Bc c/ GND	Figura A88
9	250	85	ITER	Excitação - Bd Leitura dif. - Be e Bc c/ GND	Figura A89
10	400	85	ITER	Excitação - Bd Leitura dif. - Be e Bc c/ GND	Figura 6.18
11	370	85	ITER	Excitação - Bd Leitura n/ dif. - Be e Bc c/ GND	Figura A90
12	400	85	ITER	Excitação - Be Leitura dif. - Bc e Bd c/ GND	Figura A91
13	1000	45	2	Excitação - Bc Leitura dif. - Be e Bd c/ GND	Figura A92
14	500	50	2	Excitação - Bc Leitura dif. - Be e Bd c/ GND	Figura 6.19
15	250	55	2	Excitação - Bc Leitura dif. - Be e Bd c/ GND	Figura A93
16	50	70	2	Excitação - Bc Leitura dif. - Be e Bd c/ GND	Figura A94

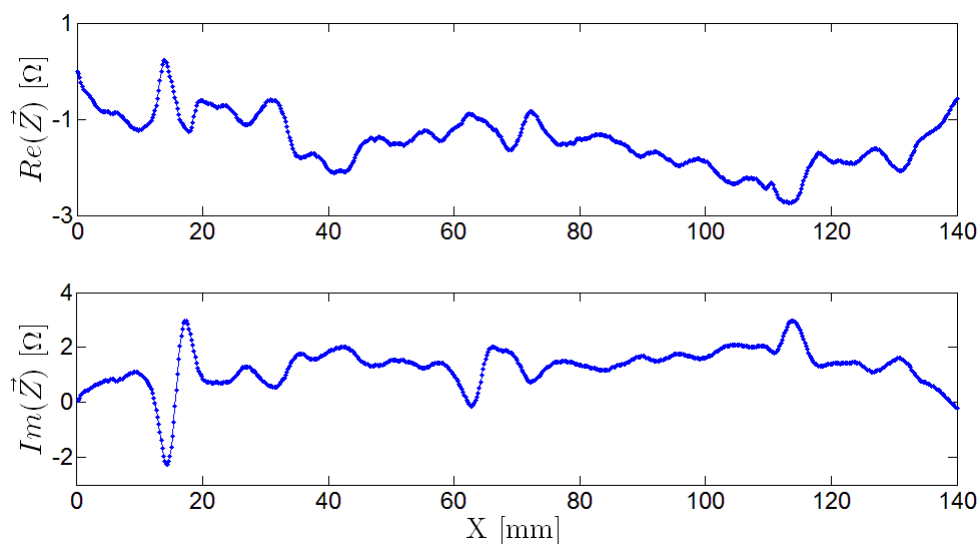


Figura A84 – Ensaio 4 – 750 kHz – Excitação na bobina Bc com leitura diferencial nas Be e Bd

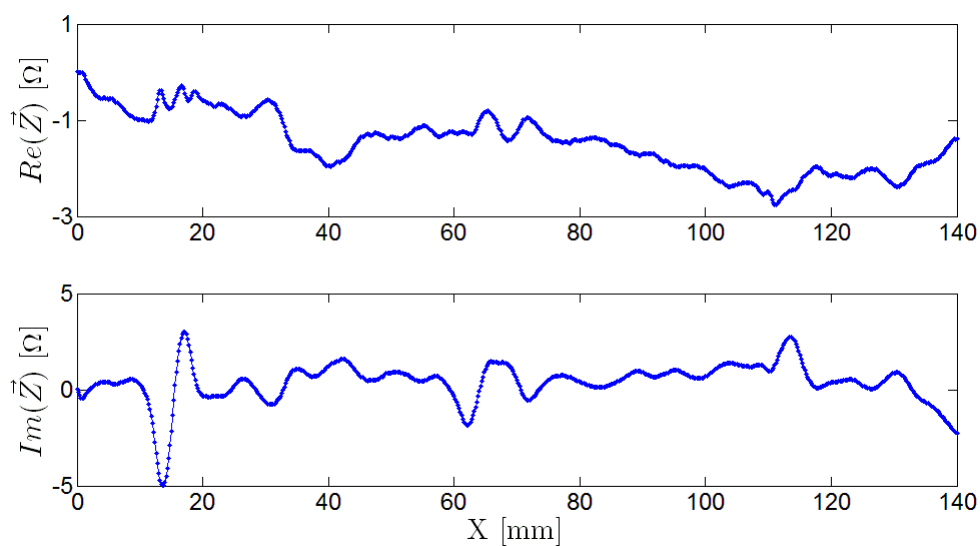


Figura A85 – Ensaio 5 – 1 MHz – Excitação na bobina Bc com leitura diferencial nas Be e Bd

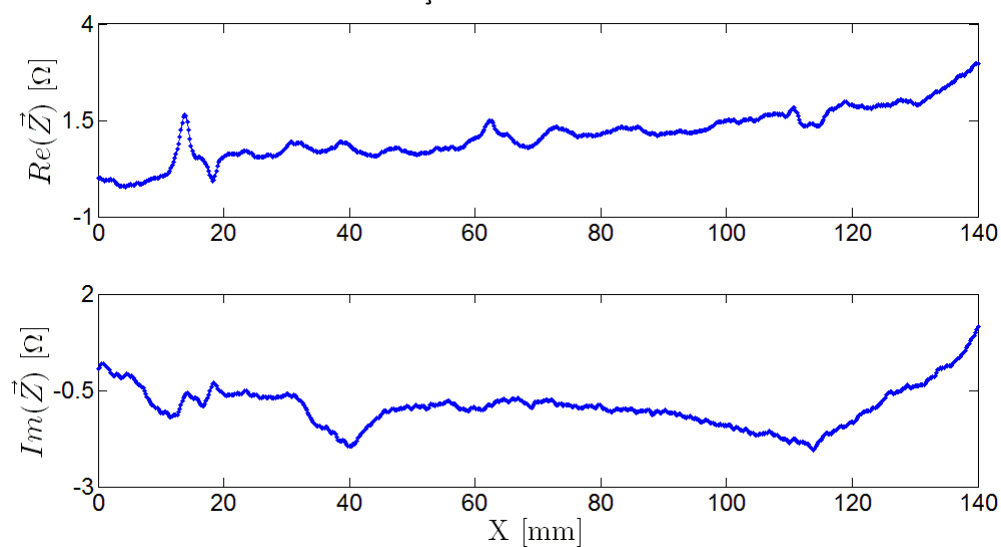


Figura A86 – Ensaio 6 – 2,5 MHz – Excitação na bobina Bc com leitura diferencial nas Be e Bd

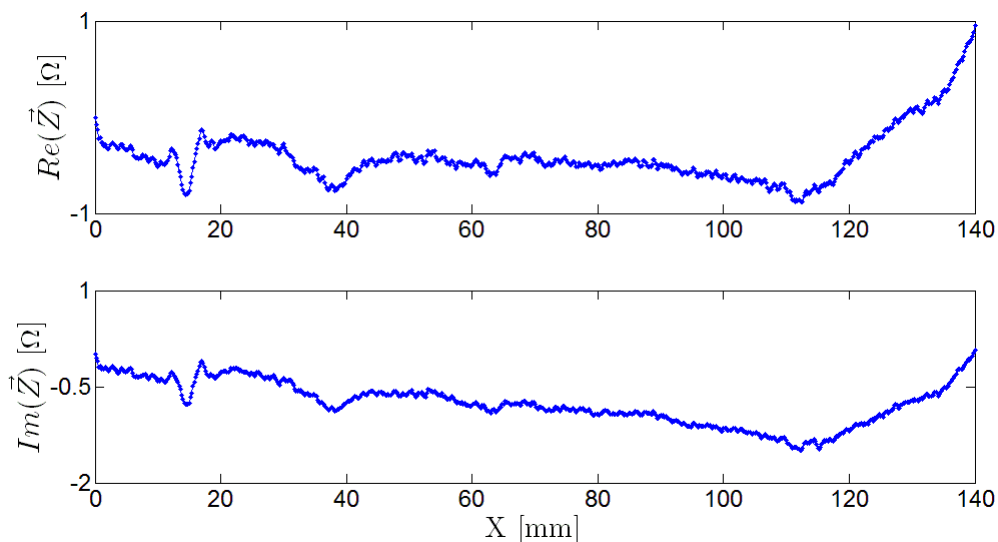


Figura A87 – Ensaio 7 – 250 kHz – Excitação na bobina Bc com leitura nas Be e Bd não diferencial

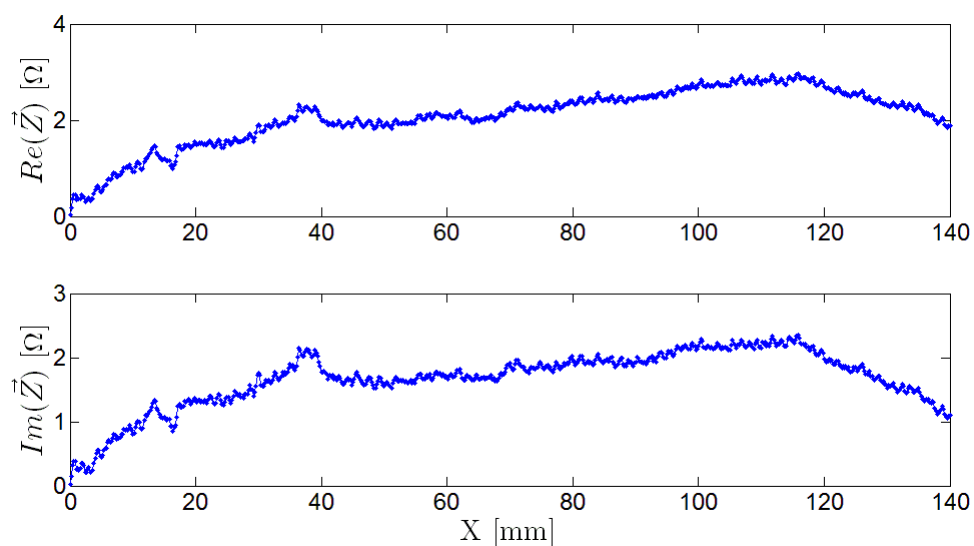


Figura A88 – Ensaio 8 – 250 kHz – Excitação na bobina Bd com leitura nas Be e Bc não diferencial

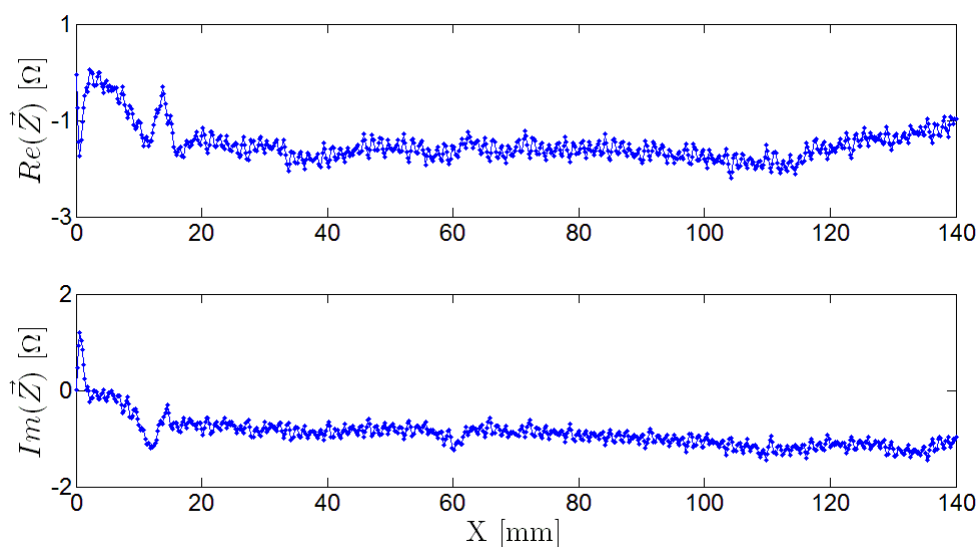


Figura A89 – Ensaio 9 – 250 kHz – Excitação na bobina Bd com leitura diferencial nas Be e Bc

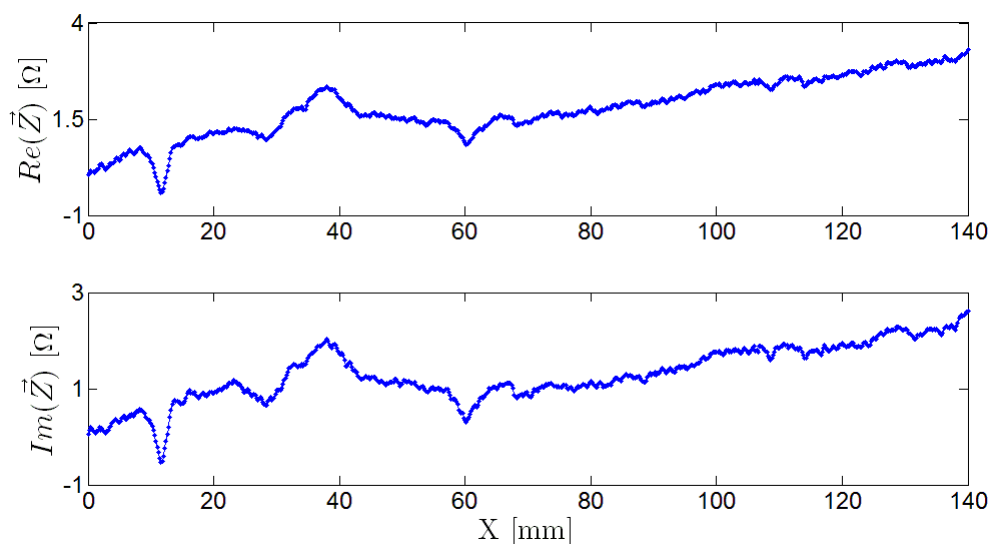


Figura A90 – Ensaio 11 – 370 kHz – Excitação na bobina Bd com leitura nas Be e Bc não diferencial

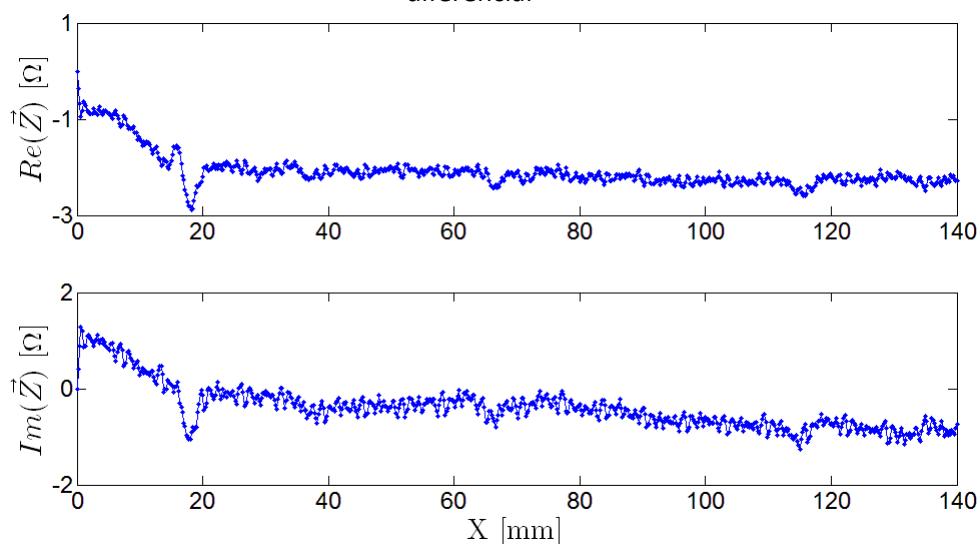


Figura A91 – Ensaio 12 – 400 kHz – Excitação na bobina Be com leitura diferencial nas Bc e Bd

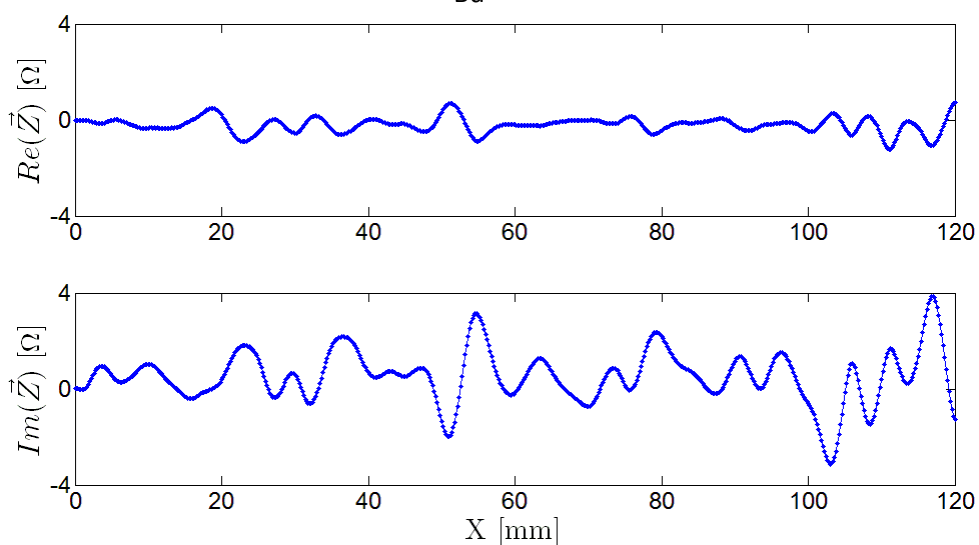


Figura A92 – Ensaio 13 – 1 MHz – Excitação na bobina Bc com leitura diferencial nas Be e Bd

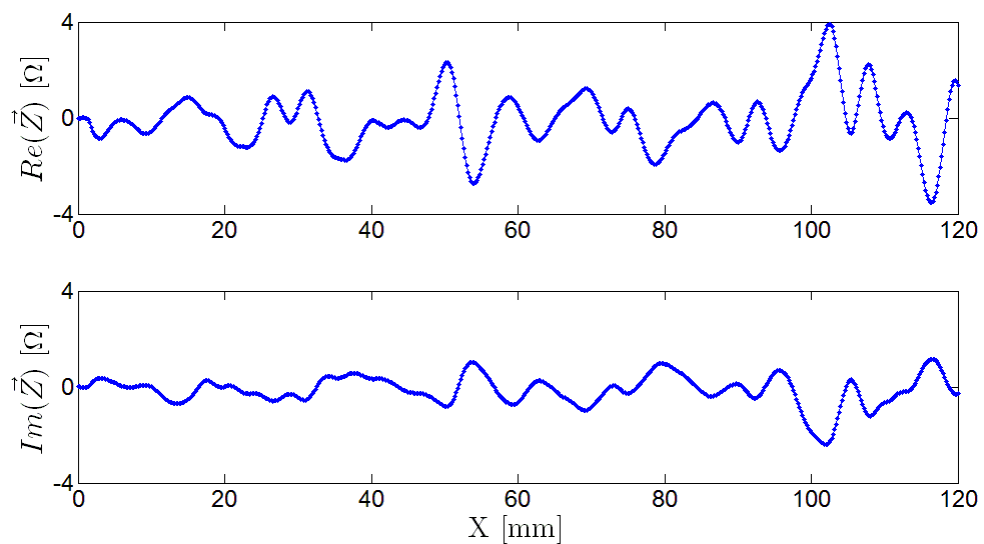


Figura A93 – Ensaio 15 –250 kHz – Excitação na bobina Bc com leitura diferencial nas Be e Bd

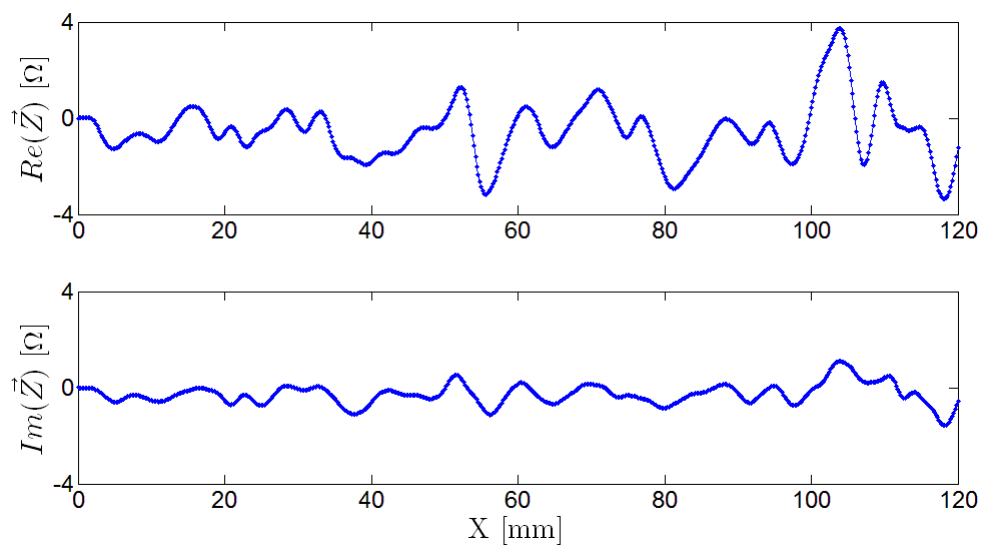


Figura A94 – Ensaio 16 –50 kHz – Excitação na bobina Bc com leitura diferencial nas Be e Bd

Anexo 10 – Resultados ensaios sonda trapezoidal vAx2x8 com excitação 8 enrolamentos axiais

Tabela A13 – Parâmetros dos ensaios realizados com a sonda trapezoidal vAx2x8 com excitação 8 enrolamentos axiais todos com L5 e a passar pelo defeito menor

Ensaio	Frequência (kHz)	Ganho	Posição	Tubo	Figura
1	500	80	9	ITER	Figura A95
2	500	80	8	ITER	Figura A96
3	500	80	7	ITER	Figura A97
4	500	80	6	ITER	Figura A98
5	500	80	5	ITER	Figura A99
6	500	80	4	ITER	Figura A100
7	500	80	3	ITER	Figura A101
8	500	80	2	ITER	Figura A102
9	500	80	1	ITER	Figura A103
10	500	80	10	ITER	Figura A104
11	500	80	11	ITER	Figura A105
12	500	80	5	ITER	Figura A106
13	250	80	5	ITER	Figura 6.22
14	1000	80	5	ITER	Figura A107
15	3800	80	5	ITER	Figura A108
16	5000	80	5	ITER	Figura 6.23
17	5000	80	1	ITER	Figura 6.24
18	1000	70	9	Aço ST 52	Figura A109
19	500	75	9	Aço ST 52	Figura 6.26
20	250	80	9	Aço ST 52	Figura A110
21	50	85	9	Aço ST 52	Figura A111

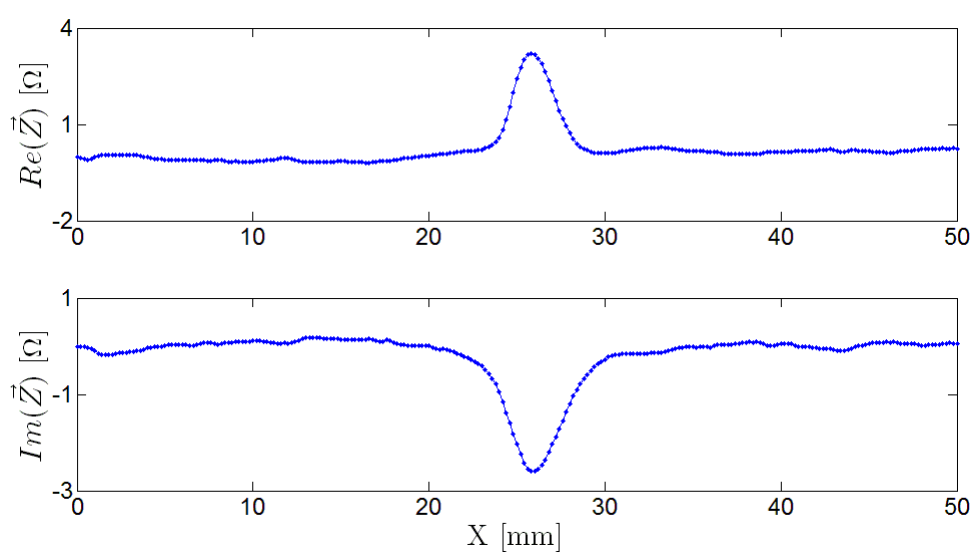


Figura A95 – Ensaio 1 – Defeito menor – 500 kHz – Posição 9

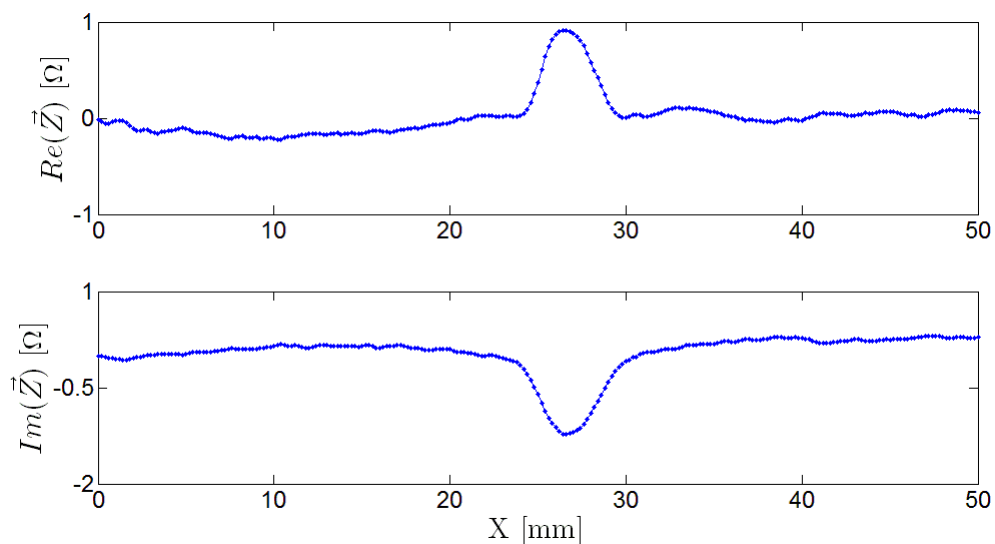


Figura A96 – Ensaio 2 – Defeito menor – 500 kHz – Posição 8

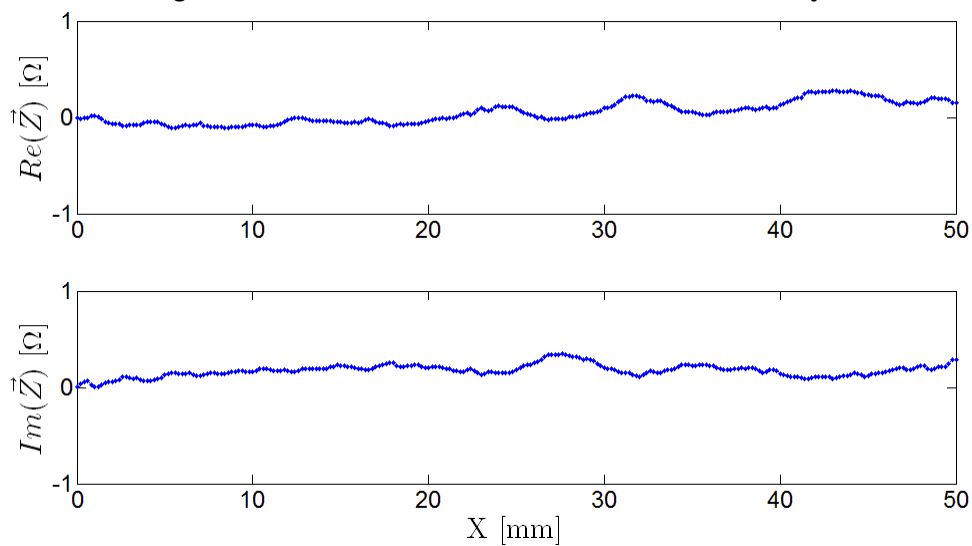


Figura A97 – Ensaio 3 – Defeito menor – 500 kHz – Posição 7

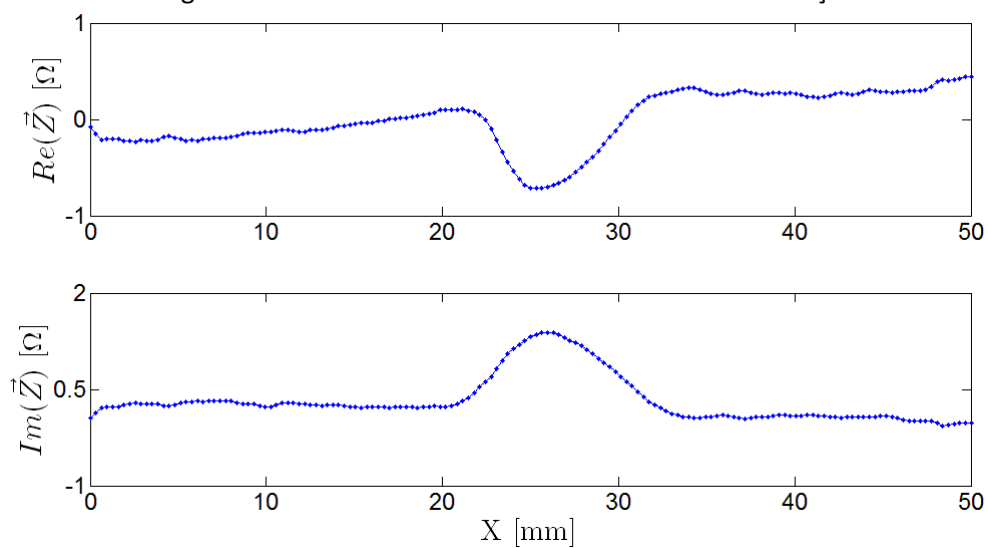


Figura A98 – Ensaio 4 – Defeito menor – 500 kHz – Posição 6

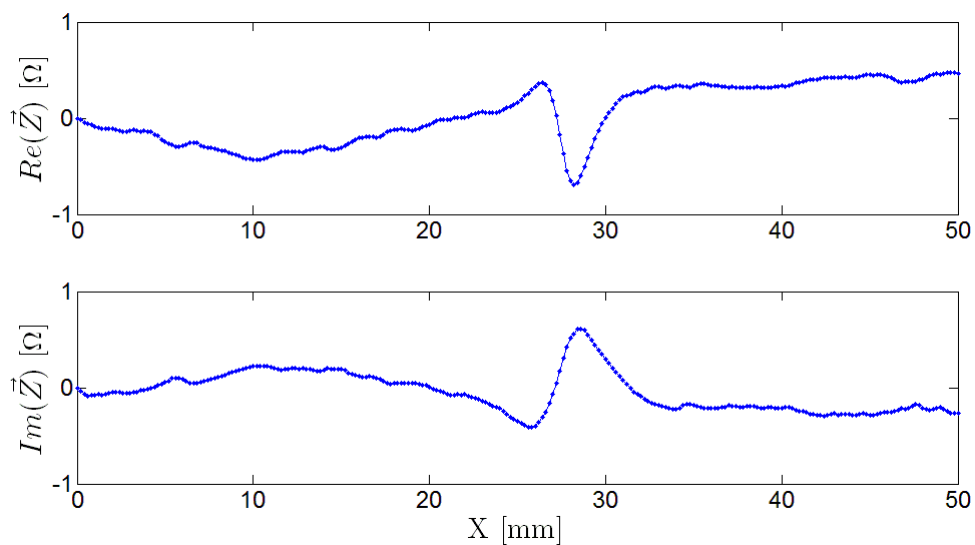


Figura A99 – Ensaio 5 – Defeito menor – 500 kHz – Posição 5

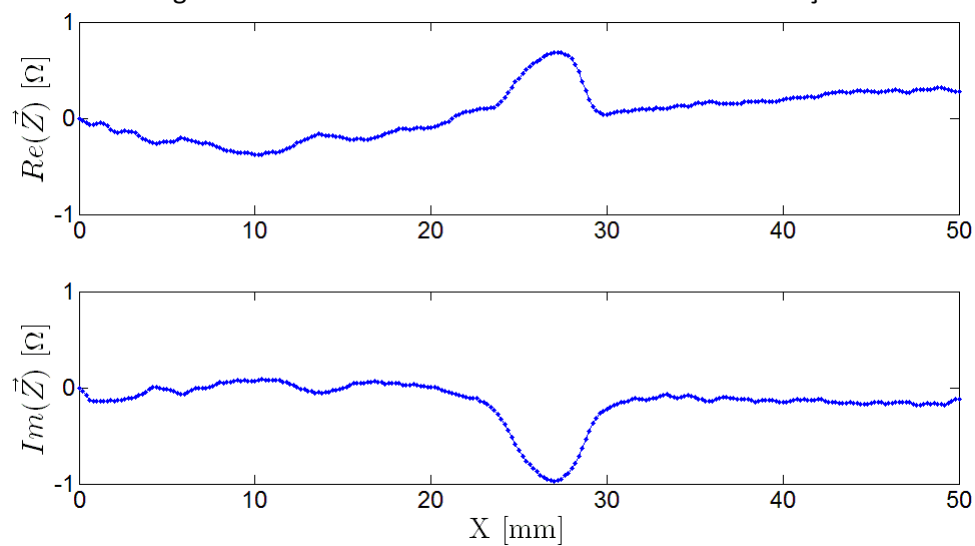


Figura A100 – Ensaio 6 – Defeito menor – 500 kHz – Posição 4

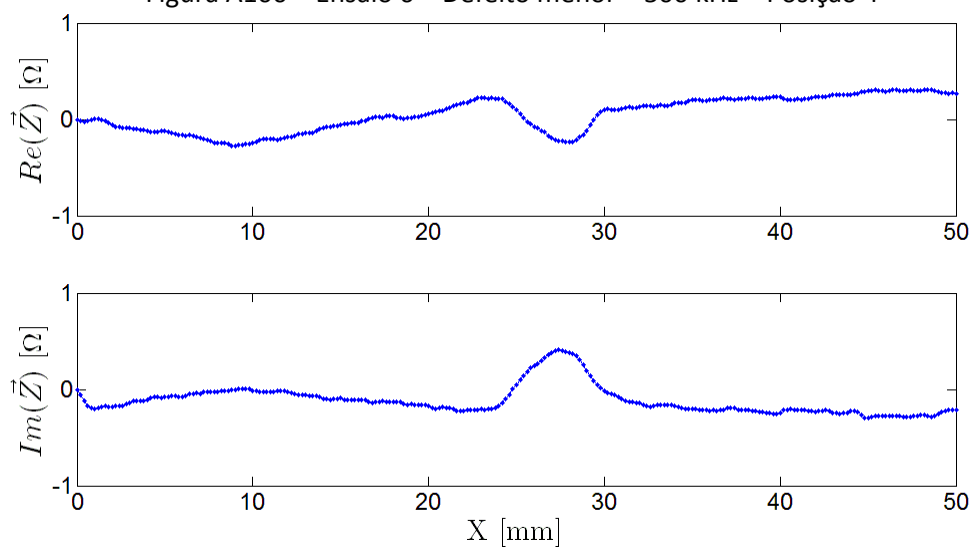


Figura A101 – Ensaio 7 – Defeito menor – 500 kHz – Posição 3

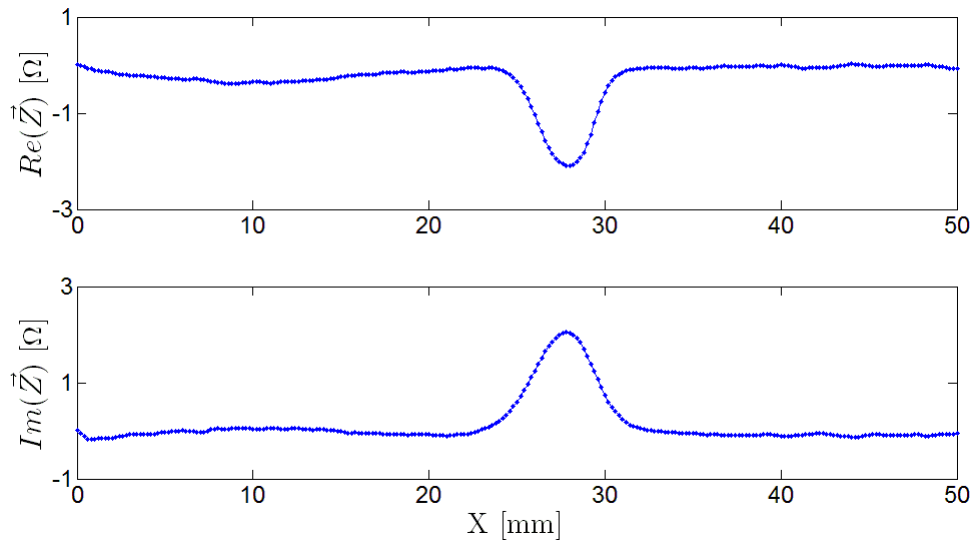


Figura A102 – Ensaio 8 – Defeito menor – 500 kHz – Posição 2

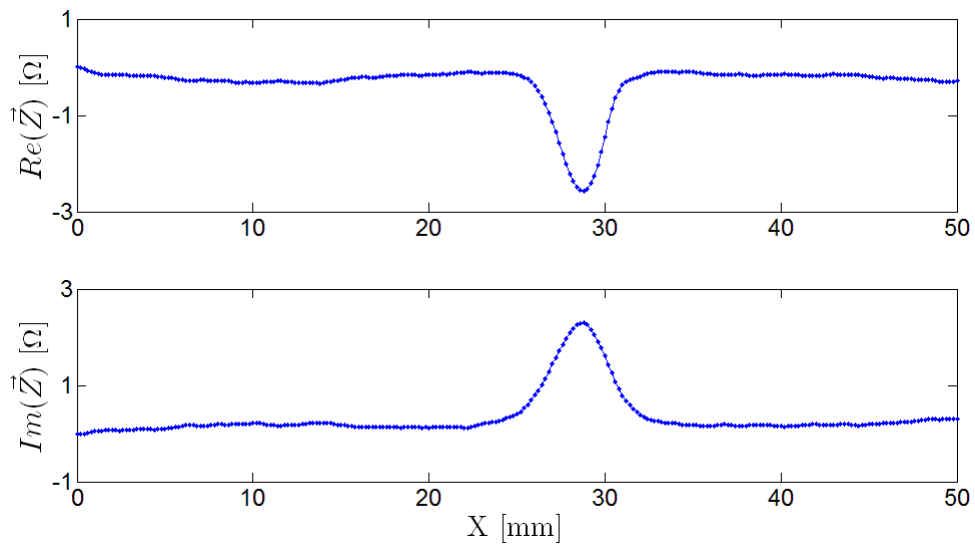


Figura A103 – Ensaio 9 – Defeito menor – 500 kHz – Posição 1

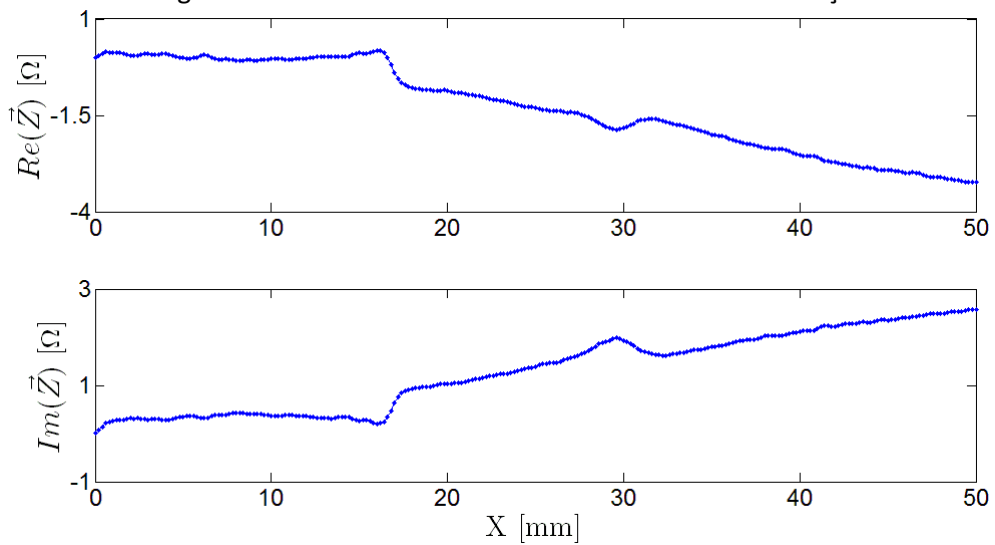


Figura A104 – Ensaio 10 – Defeito menor – 500 kHz – Posição 10

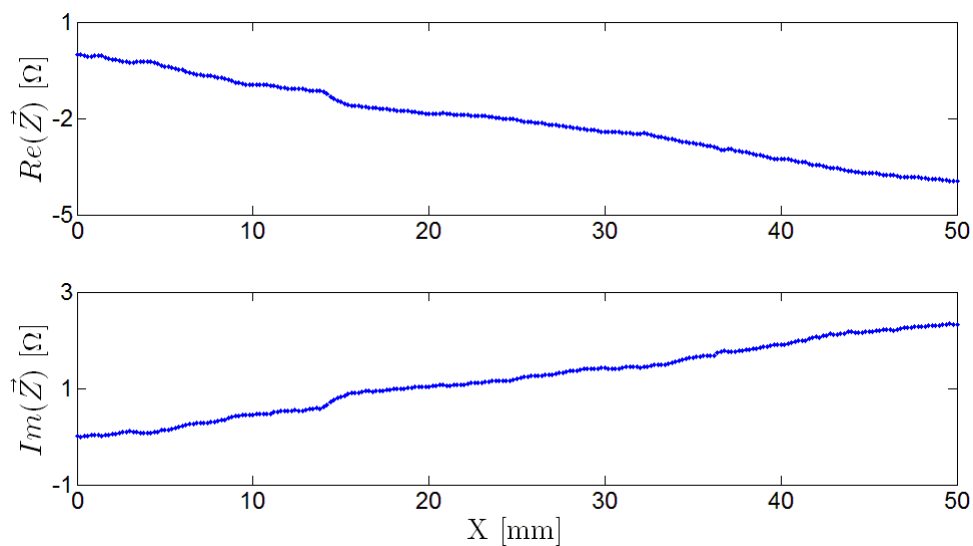


Figura A105 – Ensaio 11 – Defeito menor – 500 kHz – Posição 11

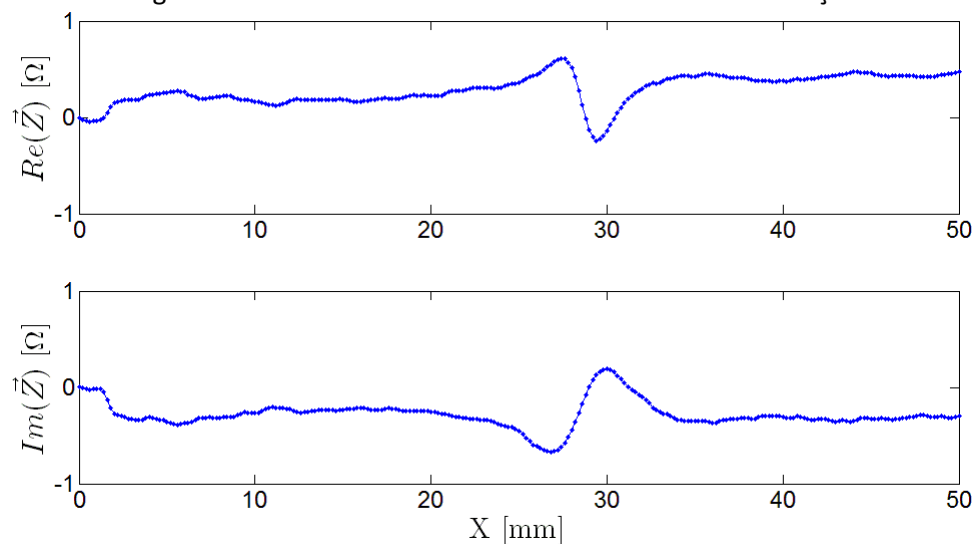


Figura A106 – Ensaio 12 – Defeito menor – 500 kHz – Posição 5

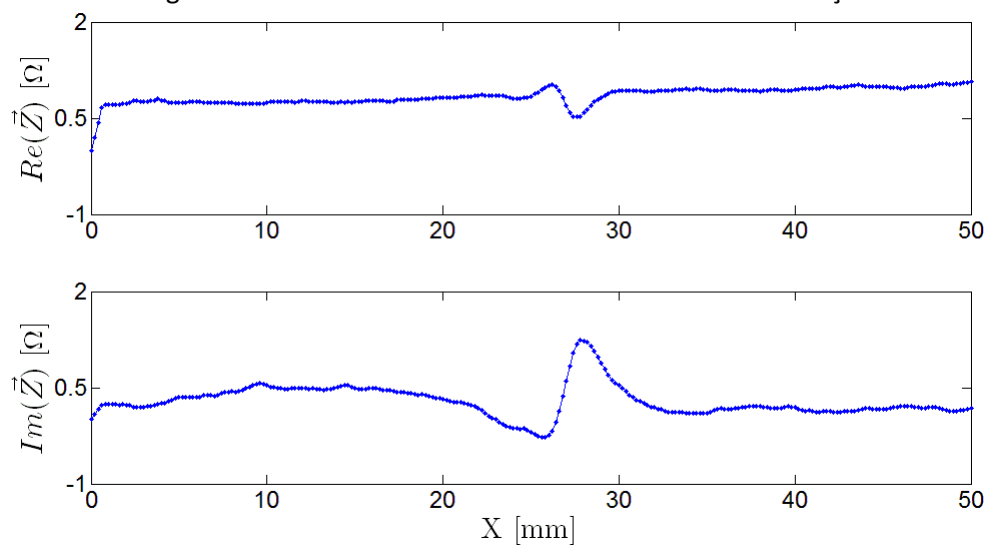


Figura A107 – Ensaio 14 – Defeito menor – 1 MHz – Posição 5

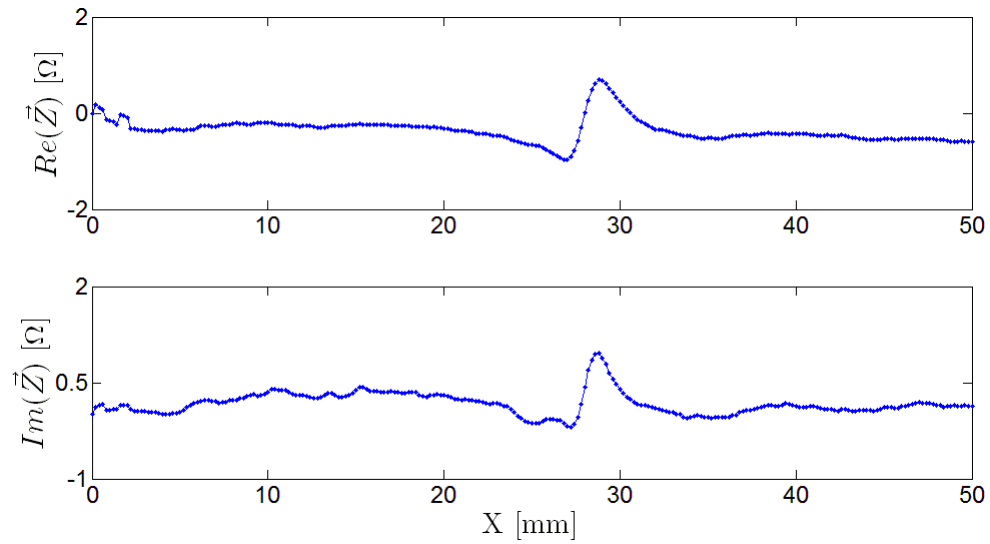


Figura A108 – Ensaio 15 – Defeito menor – 3,8 MHz – Posição 5

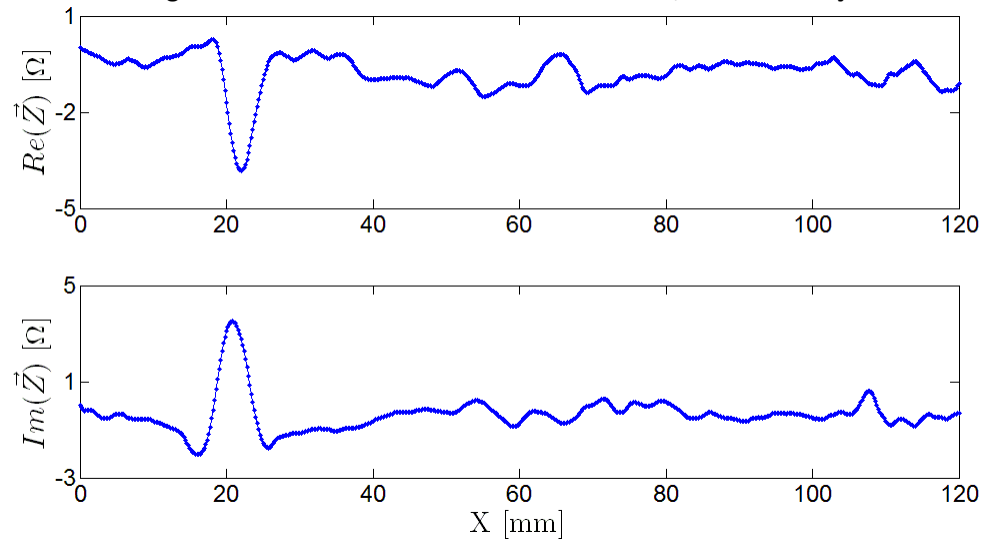


Figura A109 – Ensaio 18 – 1 MHz – Posição 9 – Tubo em aço ST 52

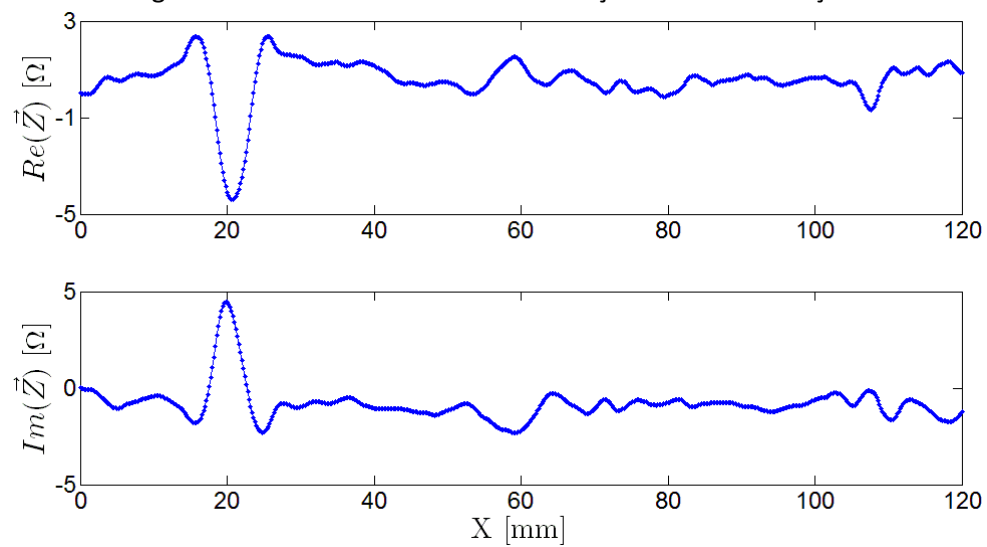


Figura A110 – Ensaio 20 – 250 kHz – Posição 9 – Tubo em aço ST 52

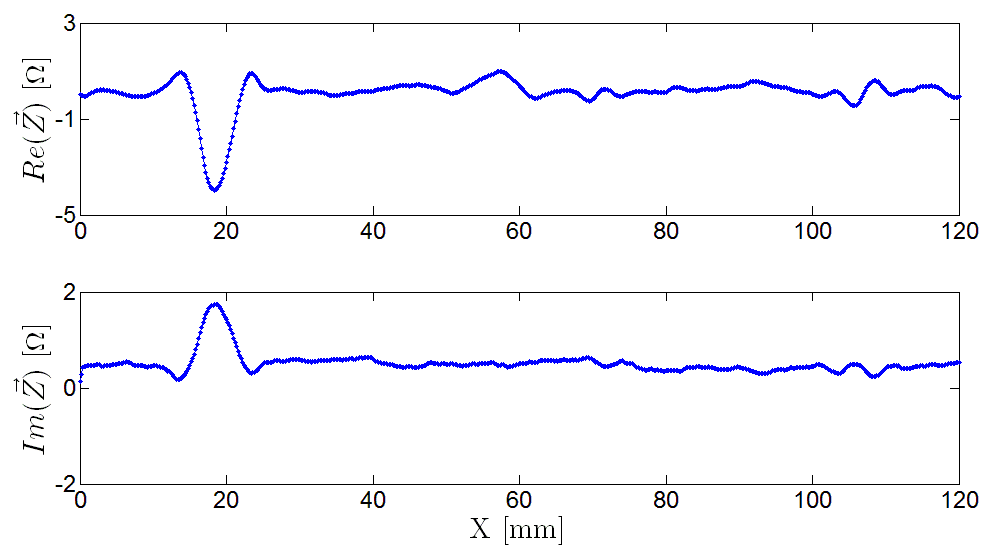


Figura A111 – Ensaio 21 – 50 kHz – Posição 9 – Tubo em aço ST 52

Anexo 11 – Resultados ensaios sonda trapezoidal vAx2x8 com excitação de 15 enrolamentos

Tabela A14 – Parâmetros dos ensaios realizados com a sonda trapezoidal vAx2x8 com excitação de 15 enrolamentos no defeito menor

Ensaio	Frequência (kHz)	Ganho (dB)	Posição	Bobina usada	Tubo	Figura
1	250	85	1	L5	ITER	Figura A112
2	500	80	1	L5	ITER	Figura A113
3	750	80	1	L5	ITER	Figura A114
4	1000	80	1	L5	ITER	Figura A115
5	2500	75	1	L5	ITER	Figura A116
6	5000	70	1	L5	ITER	Figura A117
7	500	80	3	L5	ITER	Figura A118
8	500	80	6	L5	ITER	Figura A119
9	500	80	5	L5	ITER	Figura A120
10	500	80	3	L5	ITER	Figura A121
11	250	90	1	L5	ITER	Figura A122
12	500	85	1	L5	ITER	Figura 6.29
13	750	85	1	L5	ITER	Figura A123
14	1000	80	1	L5	ITER	Figura A124
15	2500	80	1	L5	ITER	Figura A125
16	5000	80	1	L5	ITER	Figura A126
17	500	85	2	L5	ITER	Figura 6.31
18	500	85	3	L5	ITER	Figura 6.31
19	500	85	4	L5	ITER	Figura 6.31
20	500	85	5	L5	ITER	Figura 6.31
21	500	85	1	L5+L6 dif c/ GND	ITER	Figura A127
22	500	85	1	L5+L6 dif s/ GND	ITER	Figura A127
23	500	80	1	L5+L6 s/ GND	ITER	Figura A128
24	500	85	1	L4	ITER	Figura 6.29
25	500	80	1	L4	ITER	Figura 6.28
26	500	80	1	L4	ITER	Figura 6.28
27	500	80	1	L4	ITER	Figura 6.28
28	1000	50	1	L5	ST 52	Figura A129
29	500	55	1	L5	ST 52	Figura 6.35
30	250	60	1	L5	ST 52	Figura A130

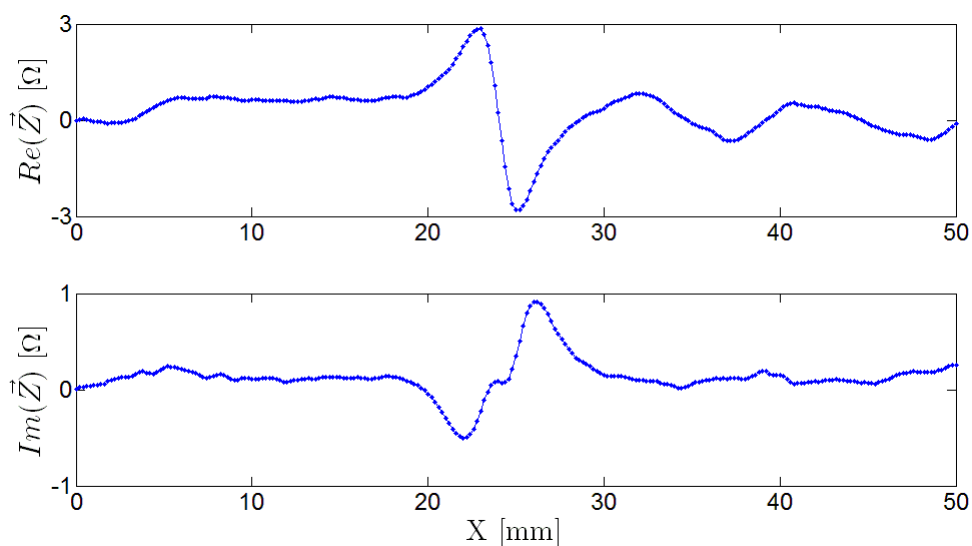


Figura A112 – Ensaio 1 – Defeito intermédio – 250 kHz – Posição 1

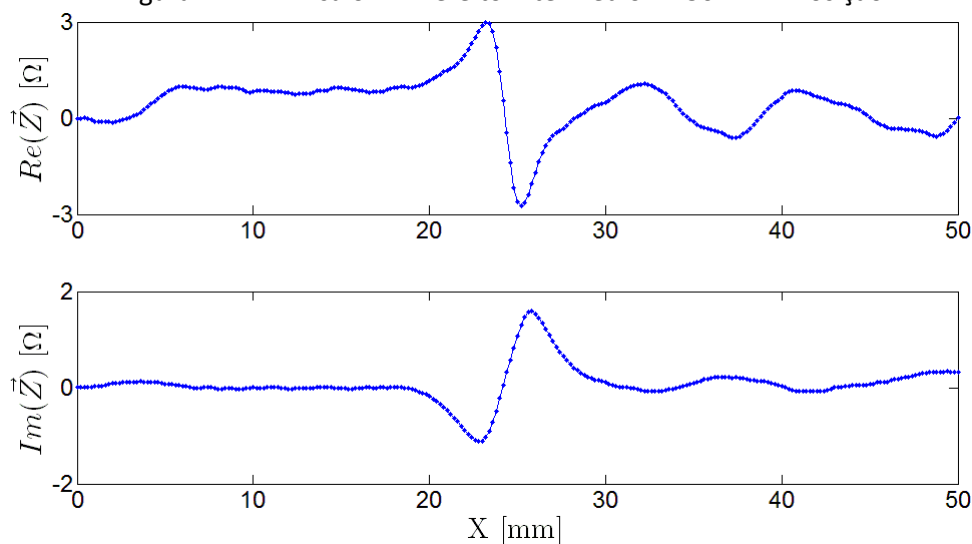


Figura A113 – Ensaio 2 – Defeito intermédio – 500 kHz – Posição 1

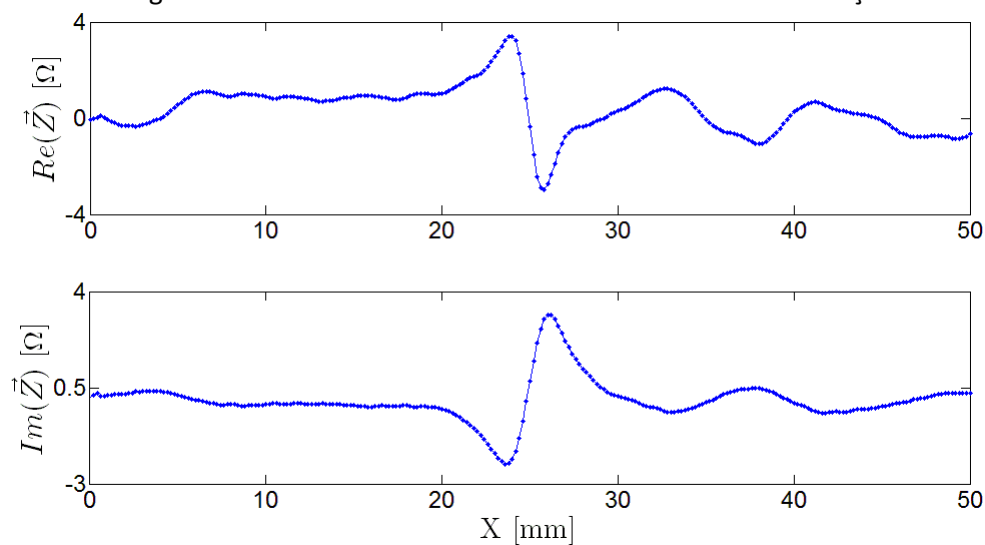


Figura A114 – Ensaio 3 – Defeito intermédio – 750 kHz – Posição 1

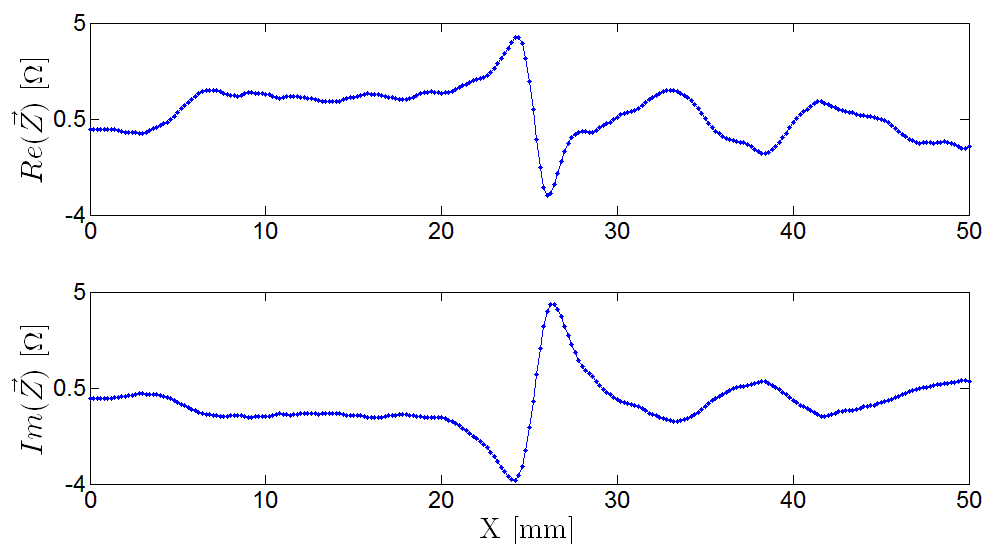


Figura A115 – Ensaio 4 – Defeito intermédio – 1 MHz – Posição 1

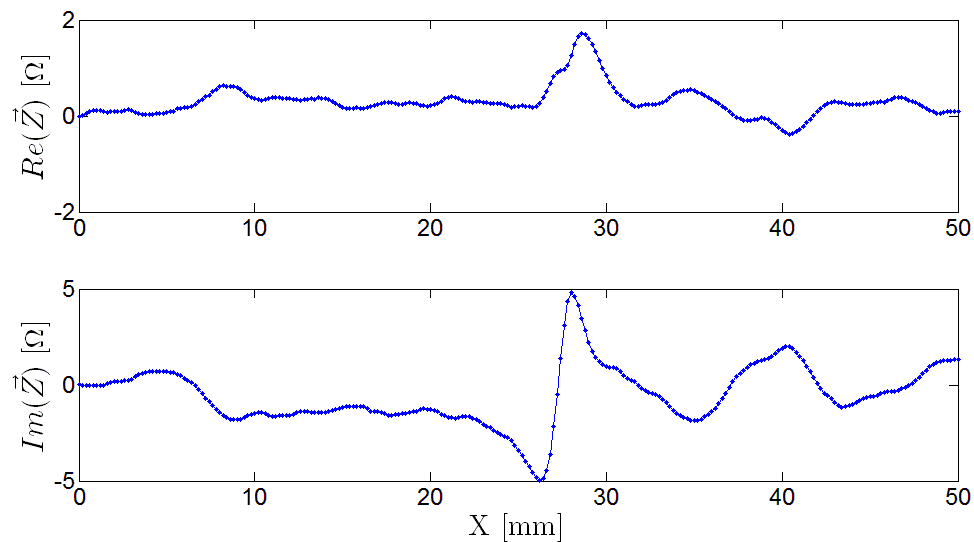


Figura A116 – Ensaio 5 – Defeito intermédio – 2,5 MHz – Posição 1

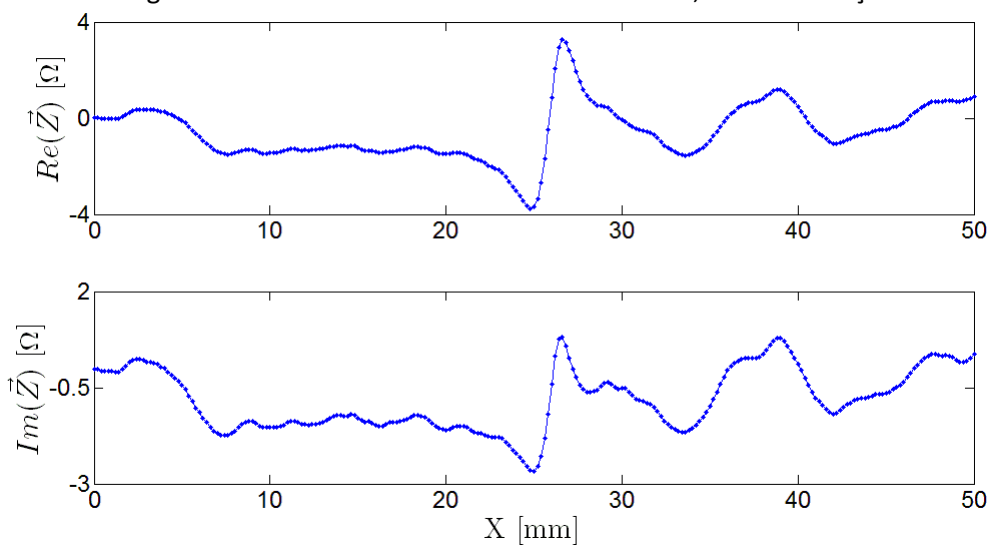


Figura A117 – Ensaio 6 – Defeito intermédio – 5 MHz – Posição 1

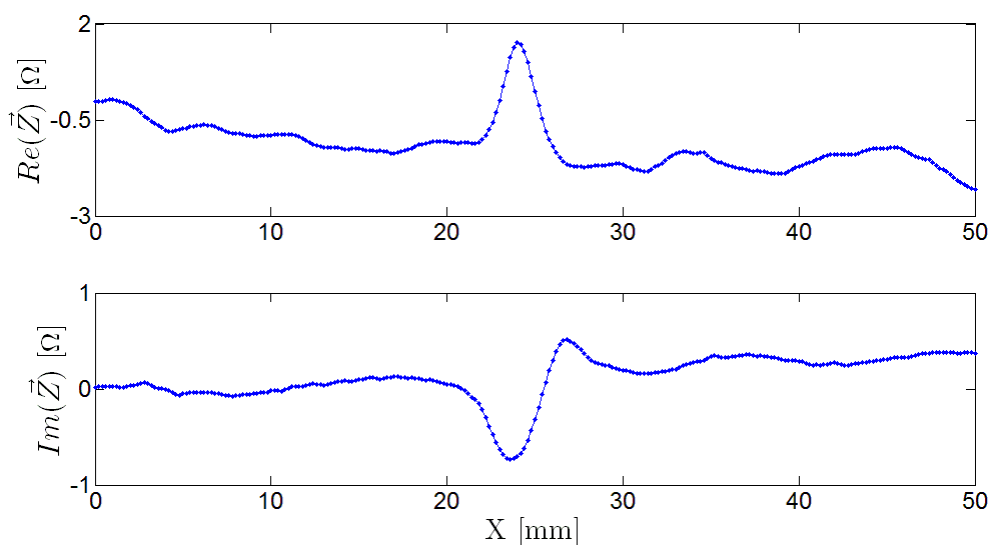


Figura A118 – Ensaio 7 – Defeito intermédio – 500 kHz – Posição 3

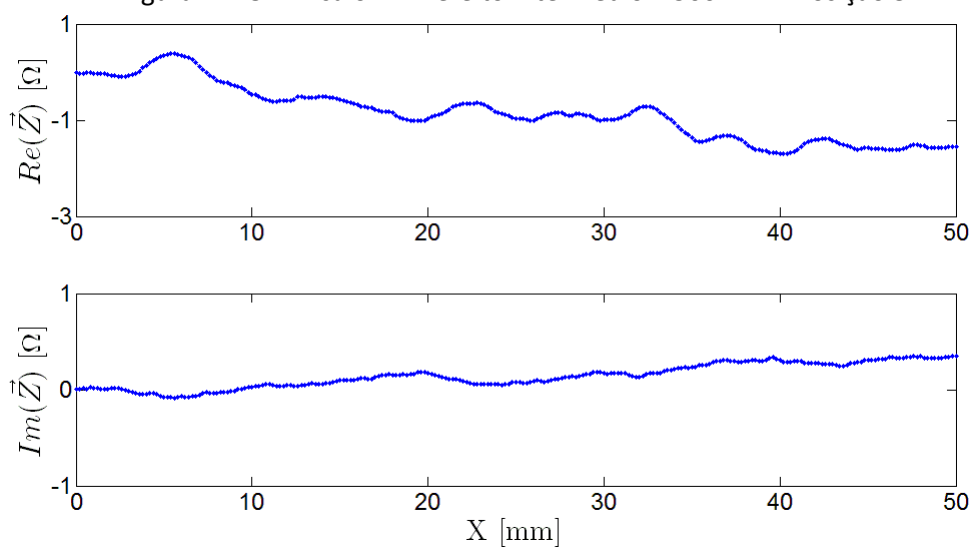


Figura A119 – Ensaio 8 – Defeito intermédio – 500 kHz – Posição 6

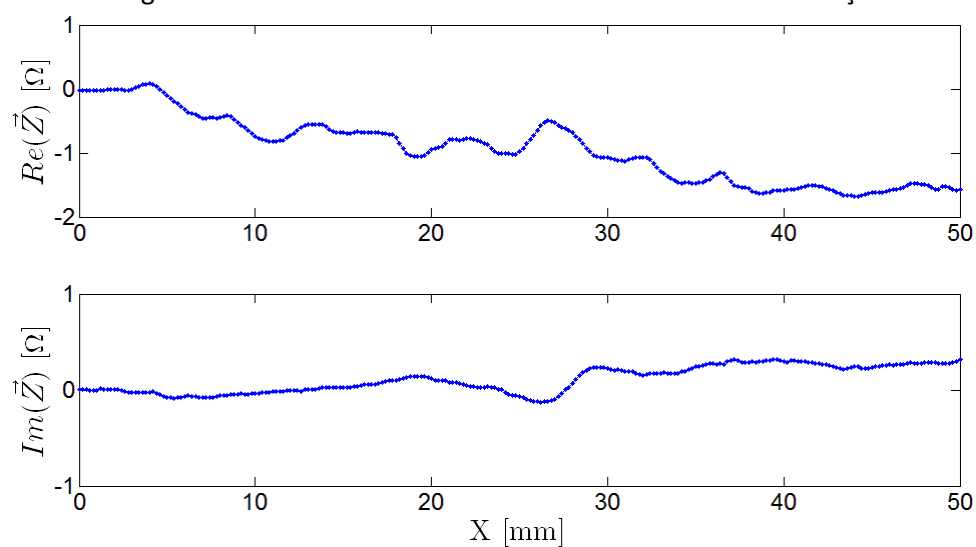


Figura A120 – Ensaio 9 – Defeito intermédio – 500 kHz – Posição 5

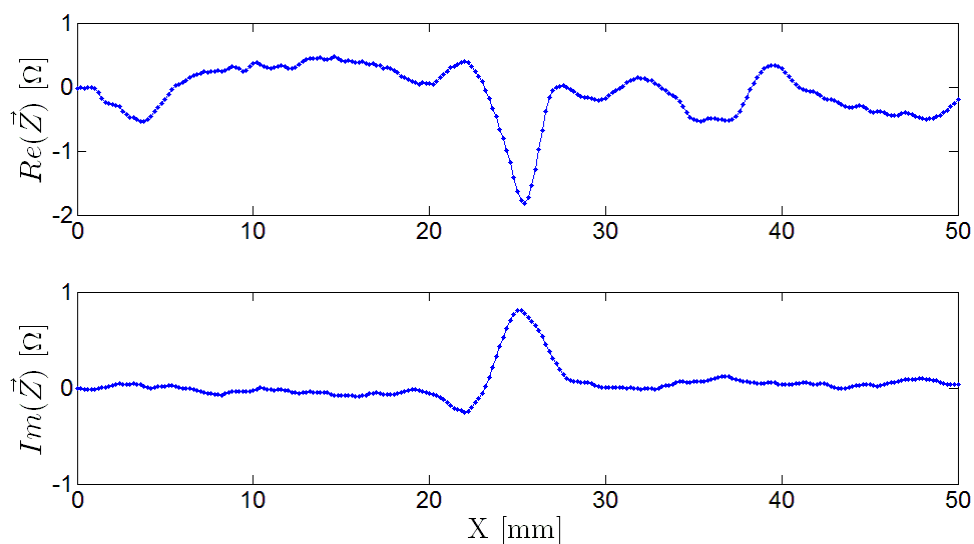


Figura A121 – Ensaio 10 – Defeito intermédio – 500 kHz – Posição 3

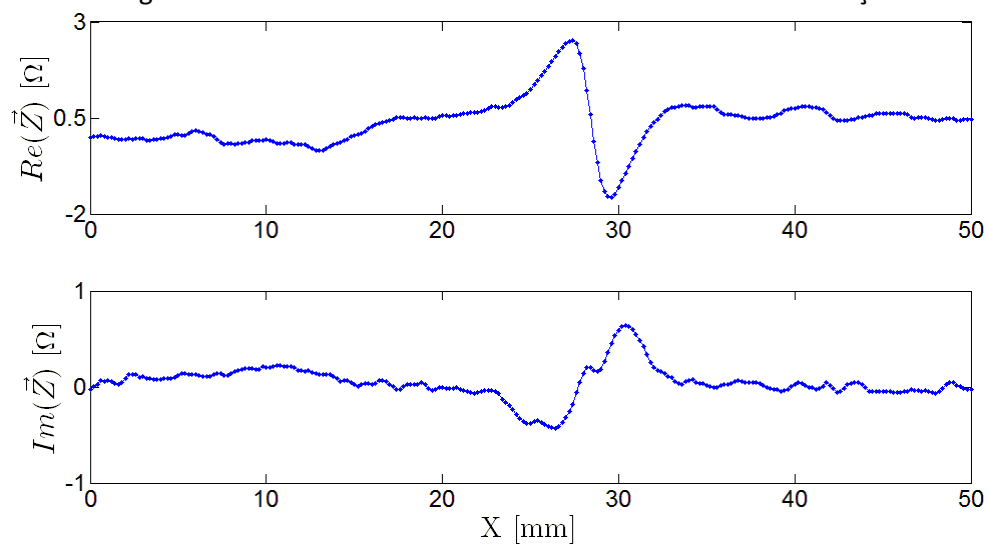


Figura A122 – Ensaio 11 – Defeito menor – 250 kHz – Posição 1

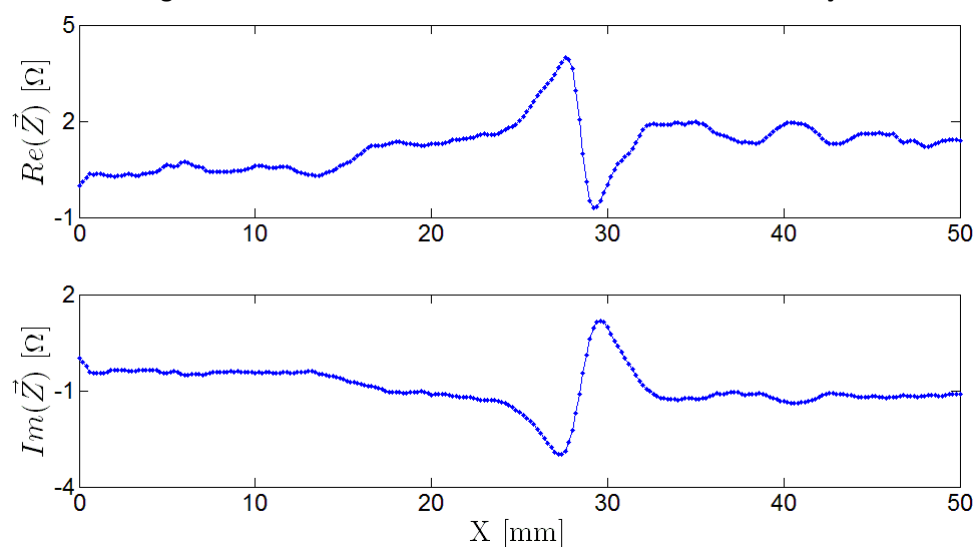


Figura A123 – Ensaio 13 – Defeito menor – 750 kHz – Posição 1

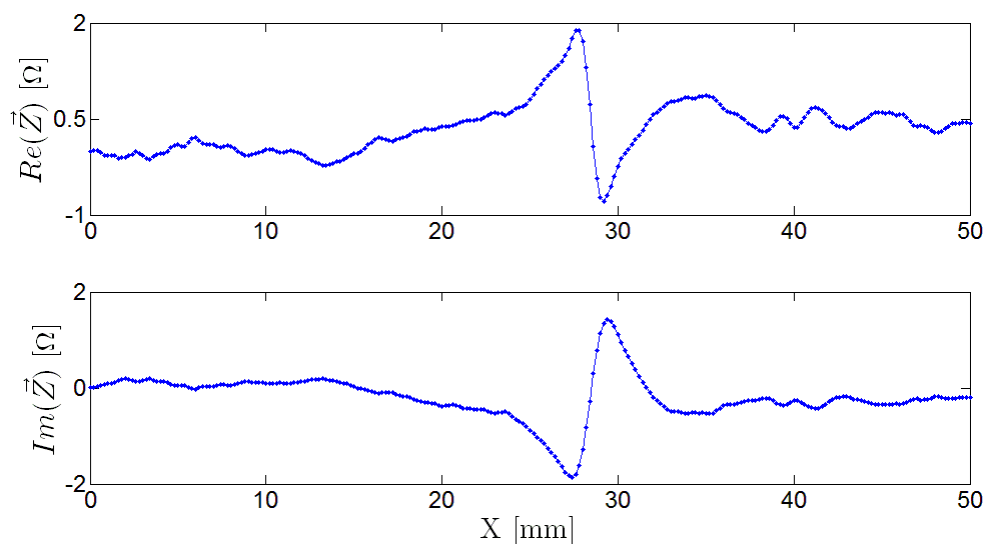


Figura A124 – Ensaio 14 – Defeito menor – 1 MHz – Posição 1

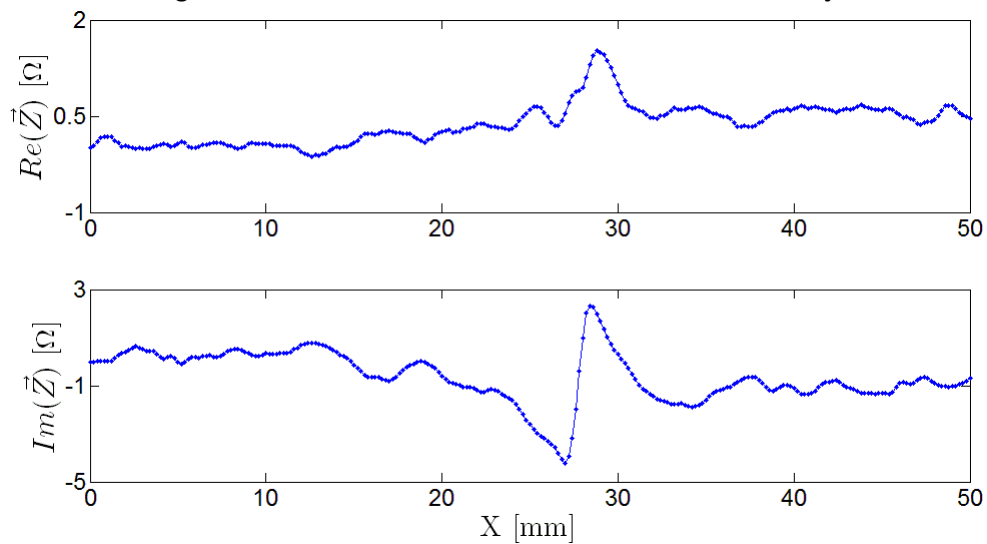


Figura A125 – Ensaio 15 – Defeito menor – 2,5 MHz – Posição 1

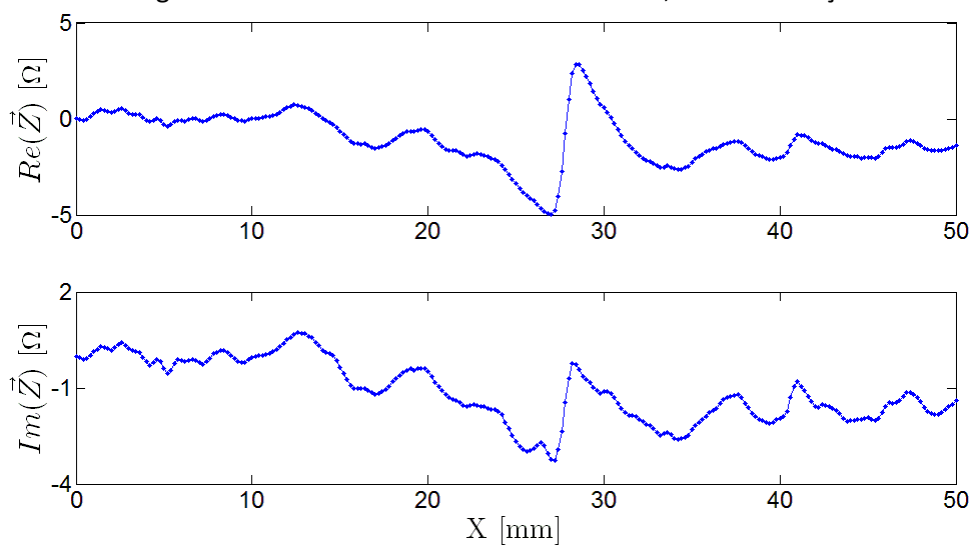


Figura A126 – Ensaio 16 – Defeito menor – 5 MHz – Posição 1

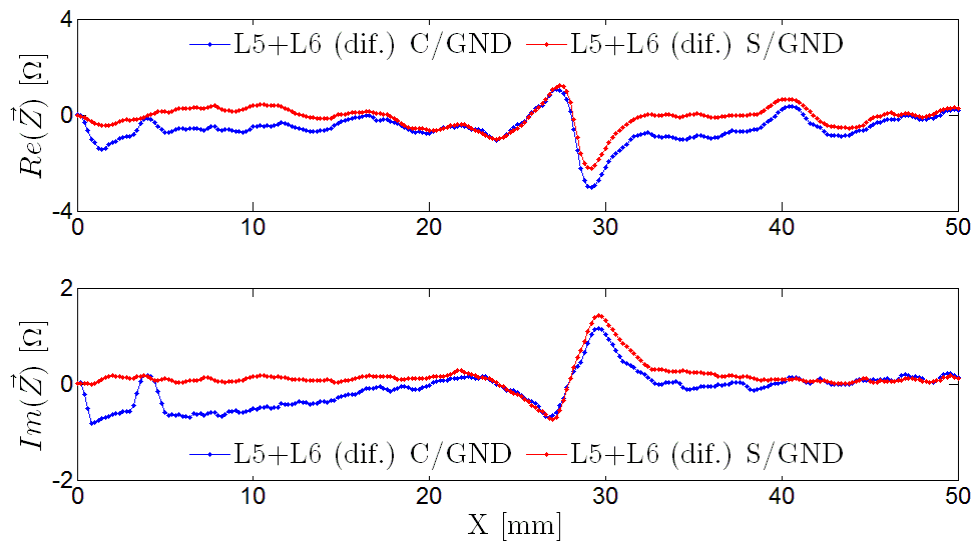


Figura A127 – Ensaio 21 e 22 – Defeito menor – 500 kHz – Posição 1

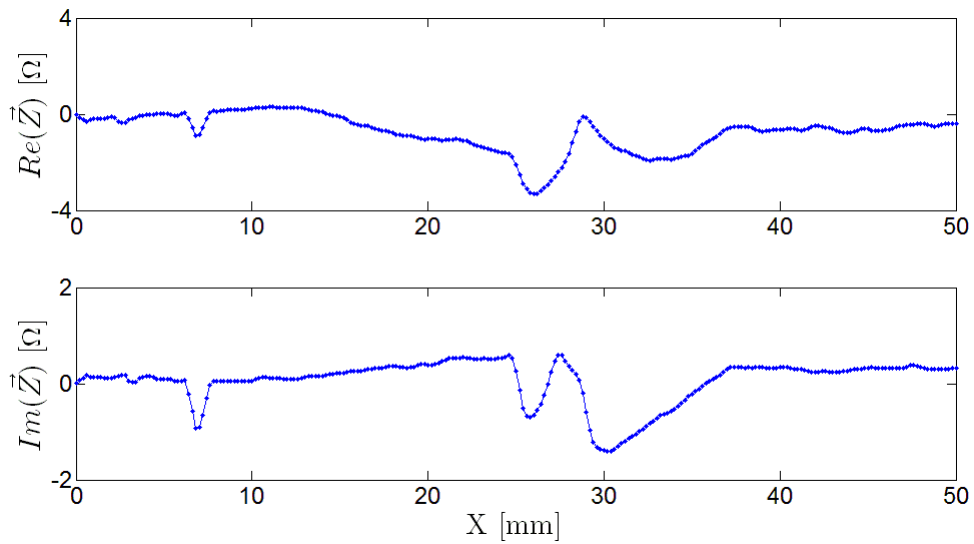


Figura A128 – Ensaio 23 – Defeito menor – 500 kHz – Posição 1

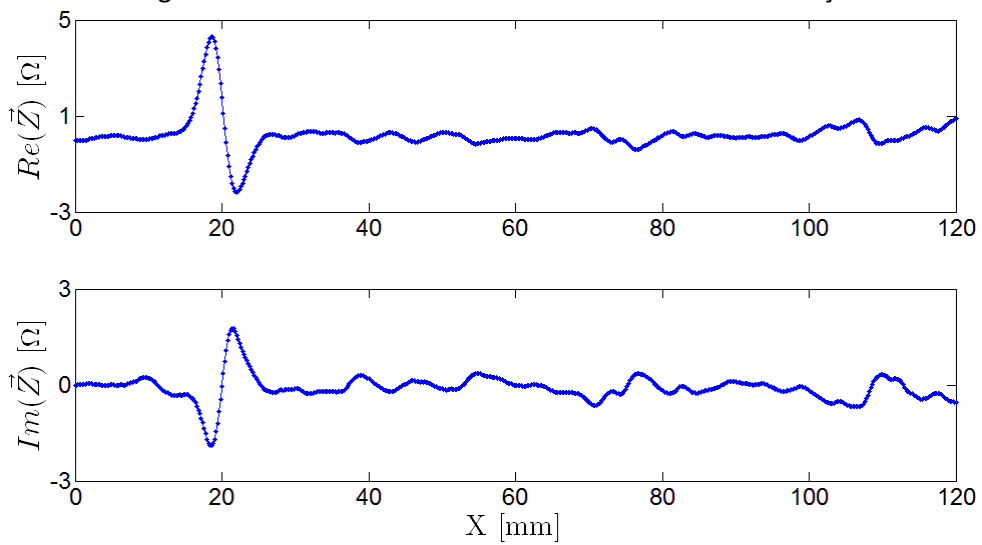


Figura A129 – Ensaio 28 – 1 MHz – Posição 1 – Tubo em aço ST 52

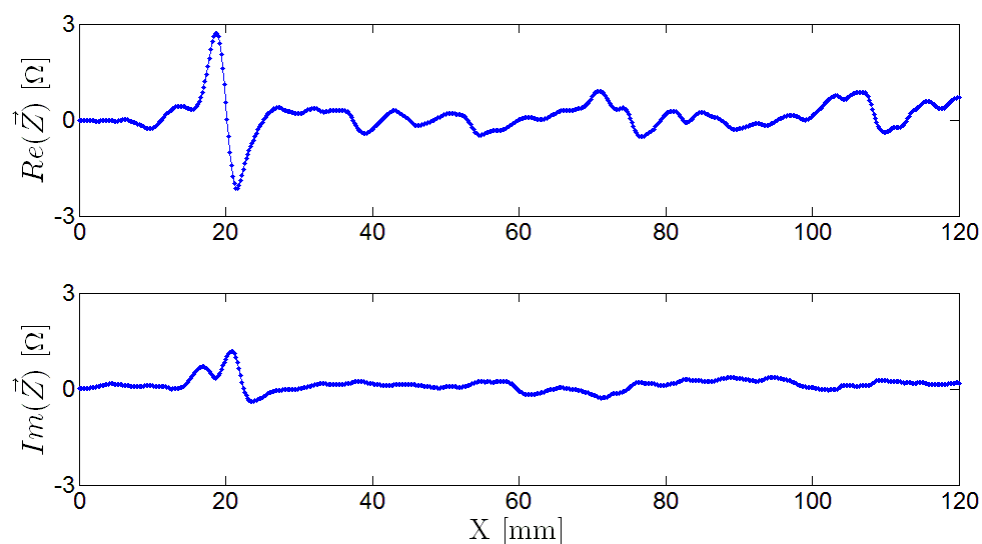


Figura A130 – Ensaio 30 – 250 kHz – Posição 1 – Tubo em aço ST 52

Anexo 12 – Resultados ensaios sonda trapezoidal vAx4 com excitação de 80 enrolamentos

Tabela A15 – Parâmetros dos ensaios realizados com a sonda trapezoidal vAx4 com excitação de 80 enrolamentos

Ensaio	Frequência (kHz)	Ganho (dB)	Posição	Defeito	Bobina usada	Figura
1	500	85	Centro L3	Intermédio	L3	Figura A131
2	250	90	Centro L3	Intermédio	L3	Figura 6.33
3	1000	85	Centro L3	Intermédio	L3	Figura A132
4	500	85	Centro L3	Menor	L3	Figura A133

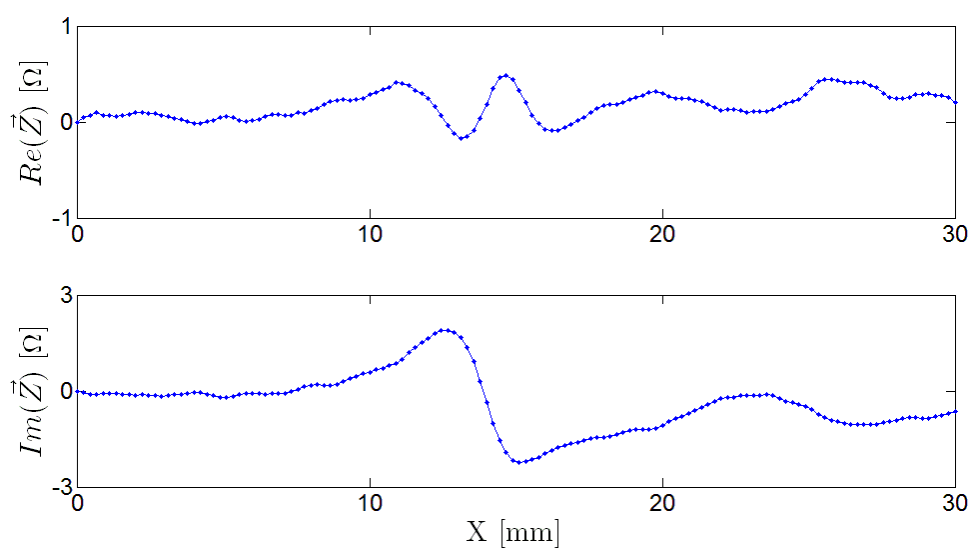


Figura A131 – Ensaio 1 – Defeito intermédio – 500 kHz – com defeito a passar pelo centro da bobina L3

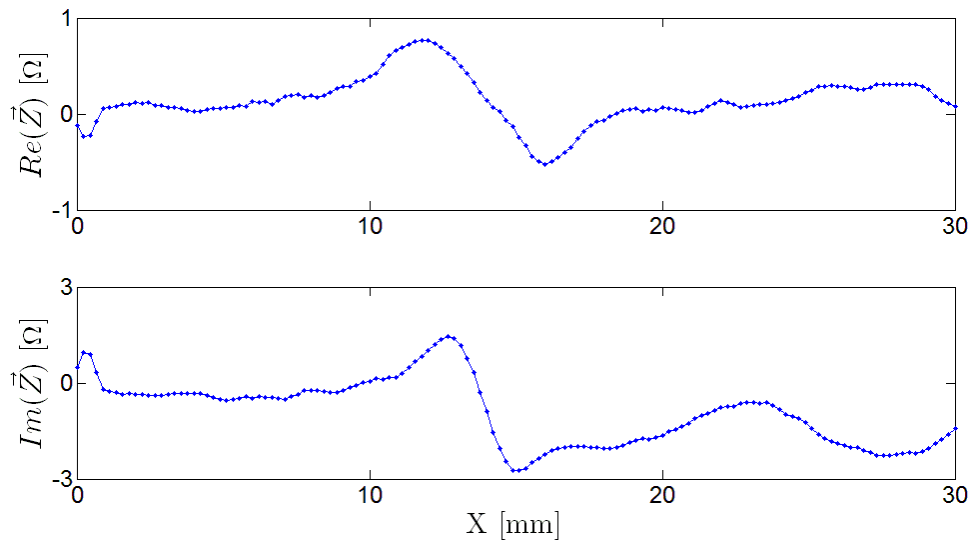


Figura A132 – Ensaio 3 – Defeito intermédio – 1 MHz – com defeito a passar pelo centro da bobina L3

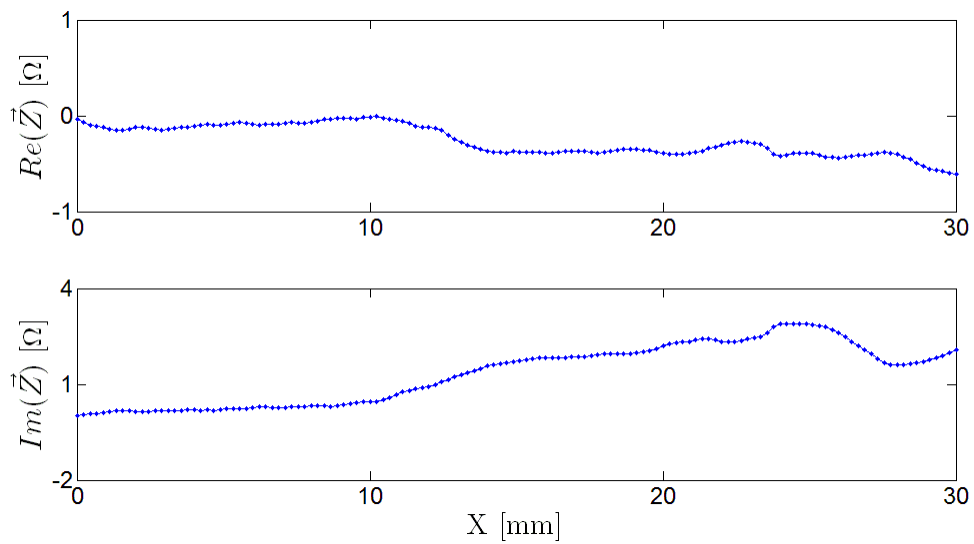


Figura A133 – Ensaio 4 – Defeito menor – 500 kHz – com defeito a passar pelo centro da bobina L3

Anexo 13 – Resultados ensaios sonda trapezoidal vAx16 com excitação de 10 + 10 + 20 enrolamentos tangenciais

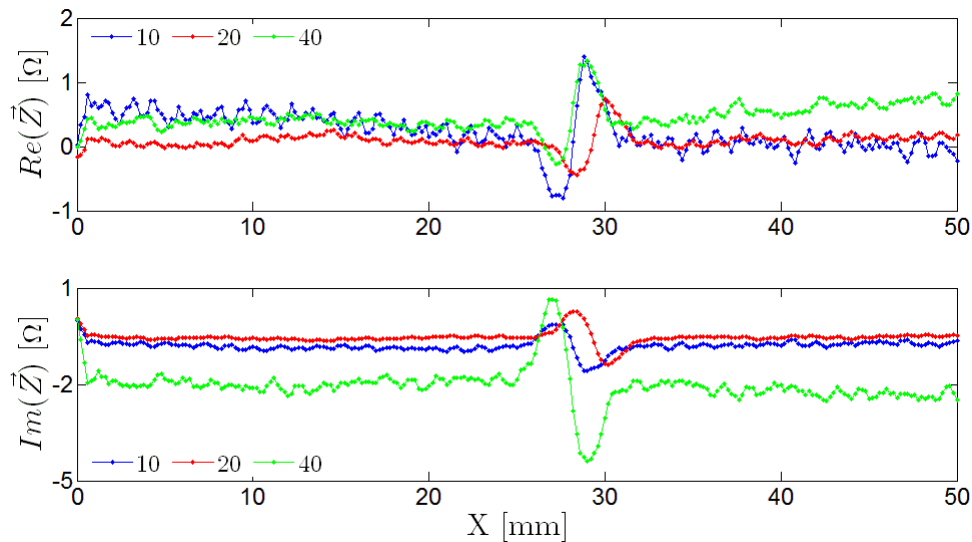


Figura A134 – Ensaio a 1 MHz – defeito menor – com diferentes números de espiras na excitação

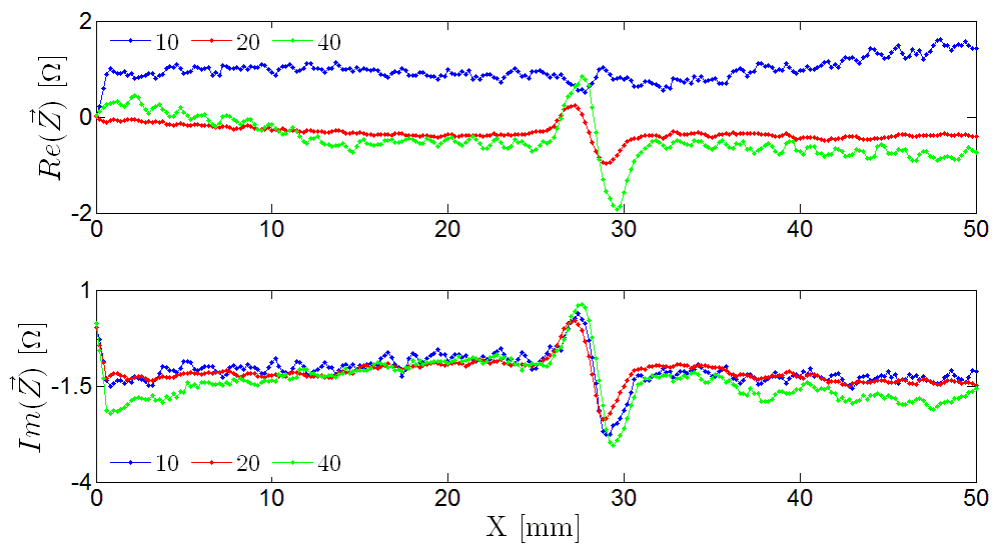


Figura A135 – Ensaio a 2,5 MHz – defeito menor – com diferentes números de espiras na excitação

Anexo 14 – Resultados ensaios sonda trapezoidal vAx2x8 com excitação e leitura

Tabela A16 – Parâmetros dos ensaios realizados com a sonda trapezoidal vAx2x8 com excitação e leitura

Ensaio	Frequência (kHz)	Ganho (dB)	Bobina usada	Posição	Defeito	Tubo	Figura
1	1000	80	L5	1	Menor	ITER	Figura A136
2	750	80	L5	1	Menor	ITER	Figura A137
3	500	80	L5	1	Menor	ITER	Figura A138
4	250	80	L5	1	Menor	ITER	Figura A139
5	500	70	L5+L4	1	Menor	ITER	Figura A140
6	500	70	L5	2	Menor	ITER	Figura 6.38
7	500	70	L5	1	Intermédio	ITER	Figura 6.37
8	500	70	L5	1	Maior	ITER	Figura 6.37
9	500	70	L5	1	Menor	ITER	Figura 6.37
10	1000	55	L5	1	-	ST 52	Figura A141
11	500	60	L5	1	-	ST 52	Figura 6.42
12	250	60	L5	1	-	ST 52	Figura A142
13	50	60	L5	1	-	ST 52	Figura A143

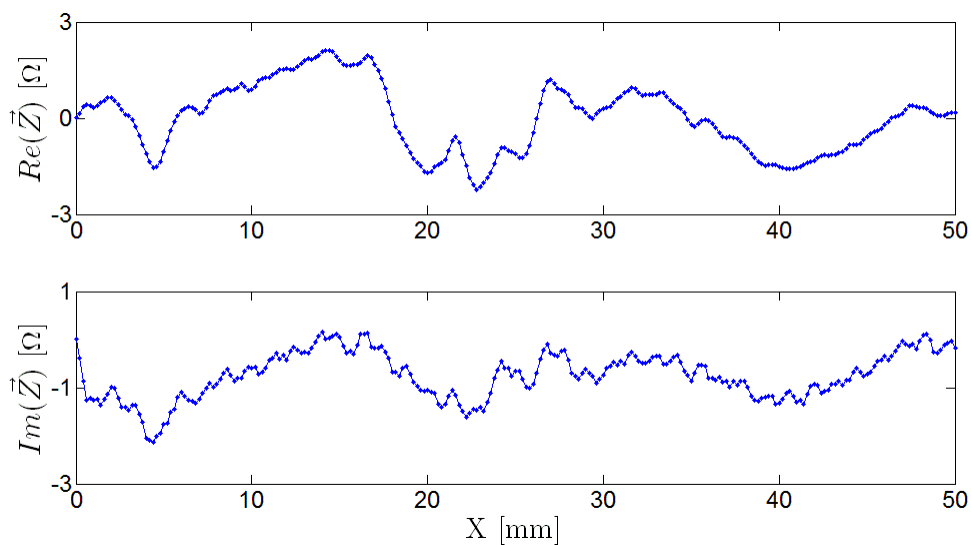


Figura A136 – Ensaio 1 – Defeito menor – 1 MHz – Posição 1

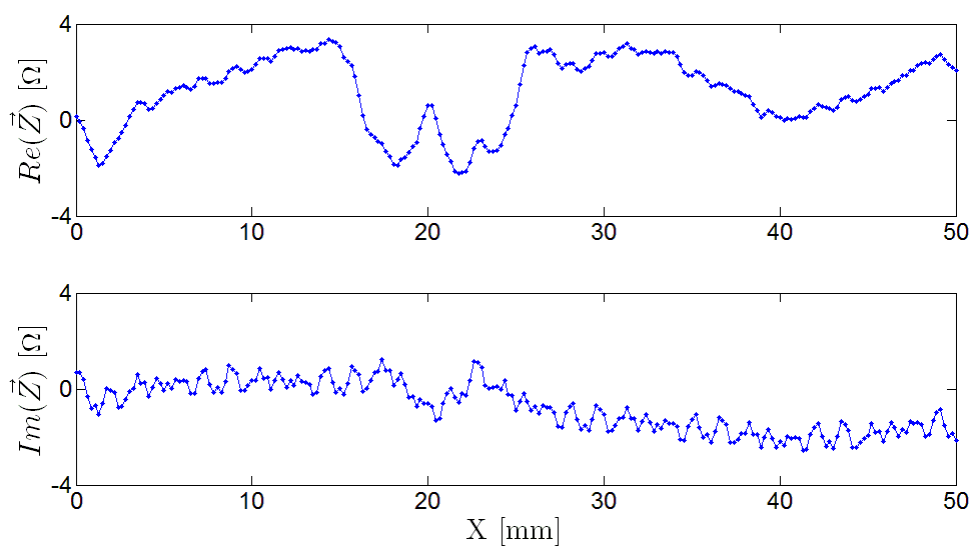


Figura A137 – Ensaio 2 – Defeito menor – 750 kHz – Posição 1

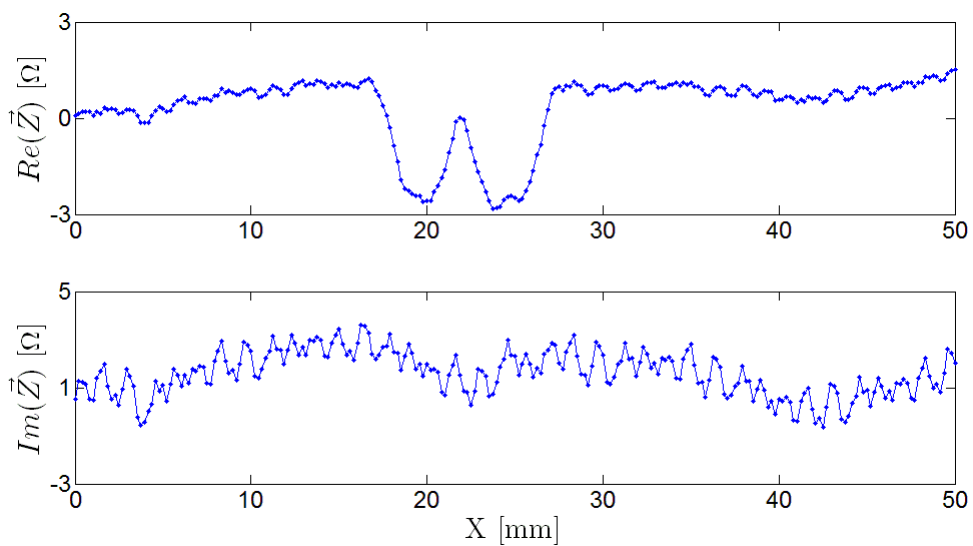


Figura A138 – Ensaio 3 – Defeito menor – 500 kHz – Posição 1

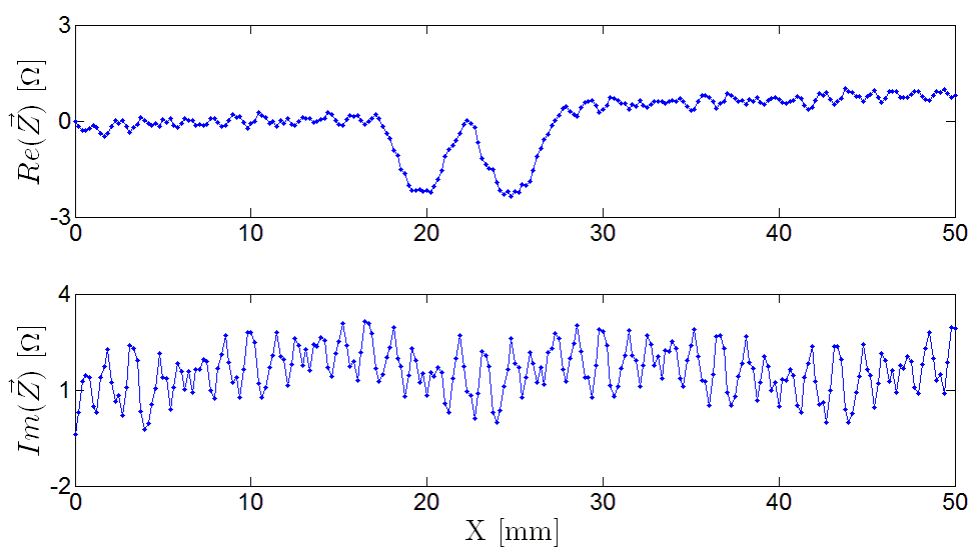


Figura A139 – Ensaio 4 – Defeito menor – 250 kHz – Posição 1

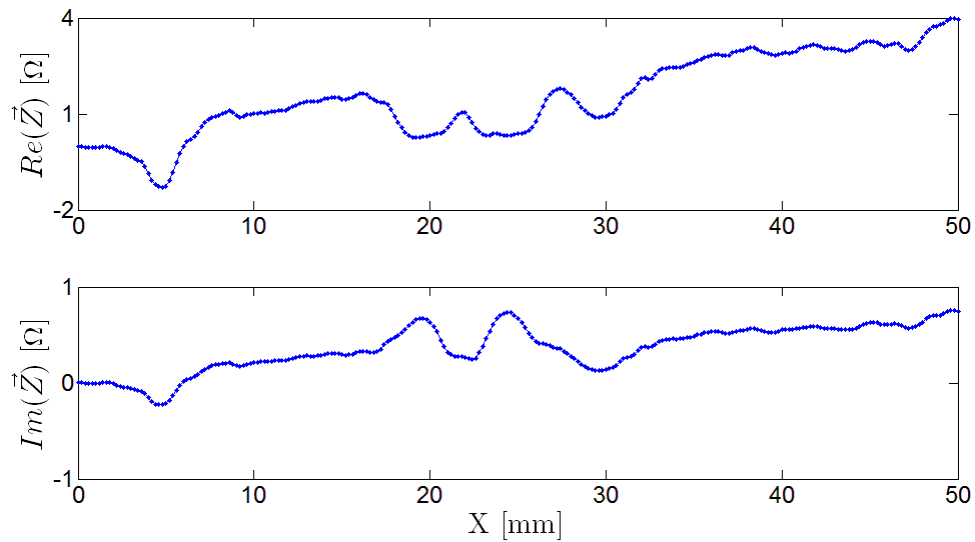


Figura A140 – Ensaio 5 – Defeito menor – 500 kHz – Posição 1 – Bobinas L4 e L5 em diferencial

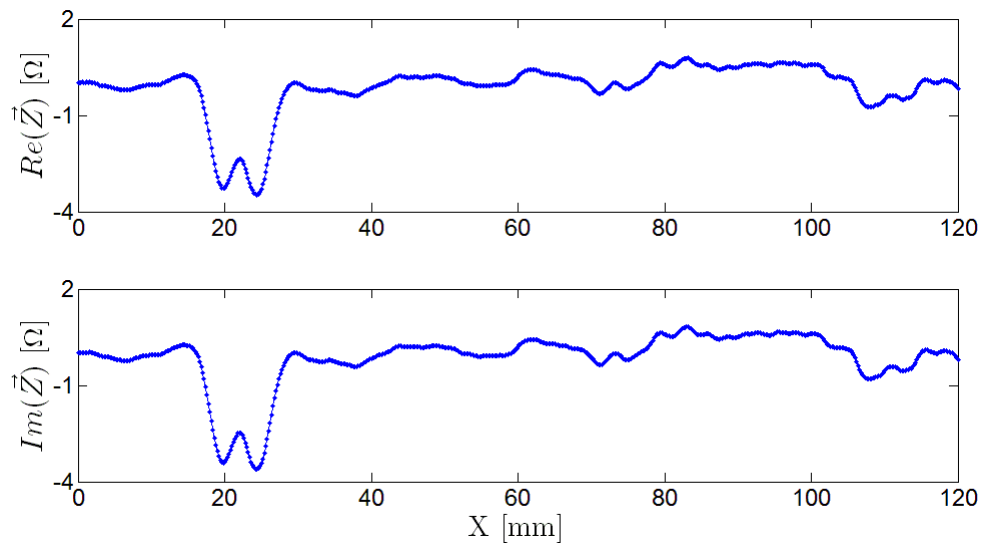


Figura A141 – Ensaio 10 – Tubo em aço ST 52 – 1 MHz – Posição 1

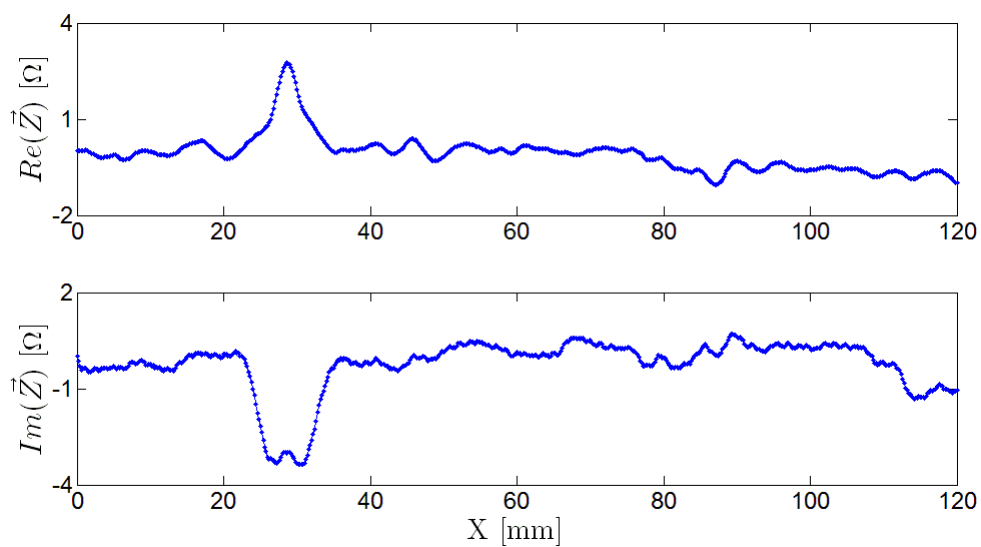


Figura A142 – Ensaio 12 – Tubo em aço ST 52 – 250 kHz – Posição 1

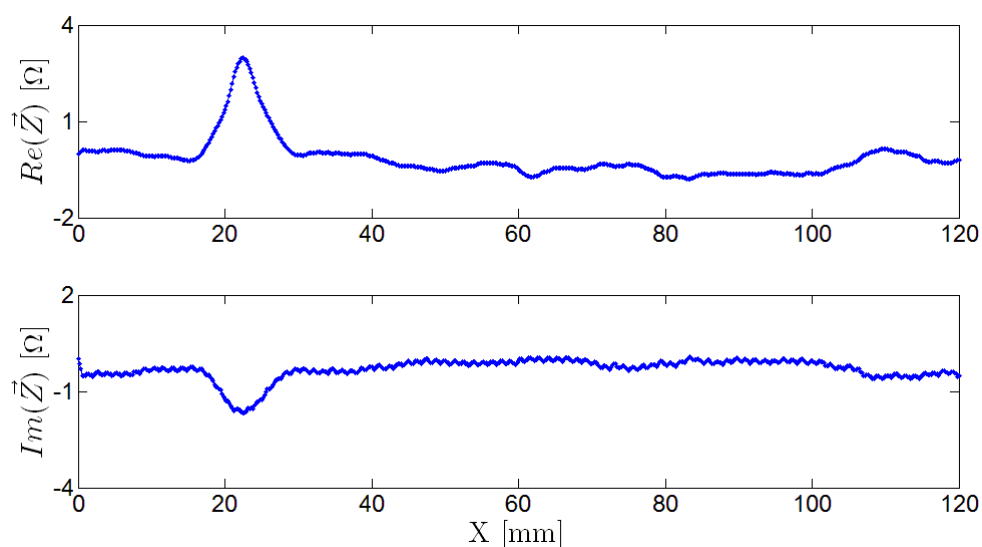


Figura A143 – Ensaio 13 – Tubo em aço ST 52 – 50 kHz – Posição 1

Anexo 15 – Resultados ensaios sonda espirais circulares com excitação e leitura

Tabela A17 – Parâmetros dos ensaios realizados com a sonda espirais com excitação e leitura

Ensaio	Frequência (kHz)	Ganho (dB)	Bobina usada	Posição	Defeito	Tubo	Figura
1	500	70	L5	1	Menor	ITER	Figura A144
2	1000	70	L5	1	Menor	ITER	Figura A145
3	250	75	L5	1	Menor	ITER	Figura A146
4	2000	75	L5	1	Menor	ITER	Figura 6.45
5	500	65	L5+L3	1	Menor	ITER	Figura 6.47
6	1000	60	L5+L3	1	Menor	ITER	Figura A147
7	250	70	L5+L3	1	Menor	ITER	Figura A148
8	500	70	L5	2	Menor	ITER	Figura A149
9	1000	65	L5	2	Menor	ITER	Figura 6.46
10	500	70	L5	2	Intermédio	ITER	Figura A150
11	500	70	L5	1	Intermédio	ITER	Figura A151
12	1000	80	L5	1	-	ST 52	Figura A152
13	500	90	L5	1	-	ST 52	Figura 6.48
14	250	85	L5	1	-	ST 52	Figura A153
15	50	90	L5	1	-	ST 52	Figura A154

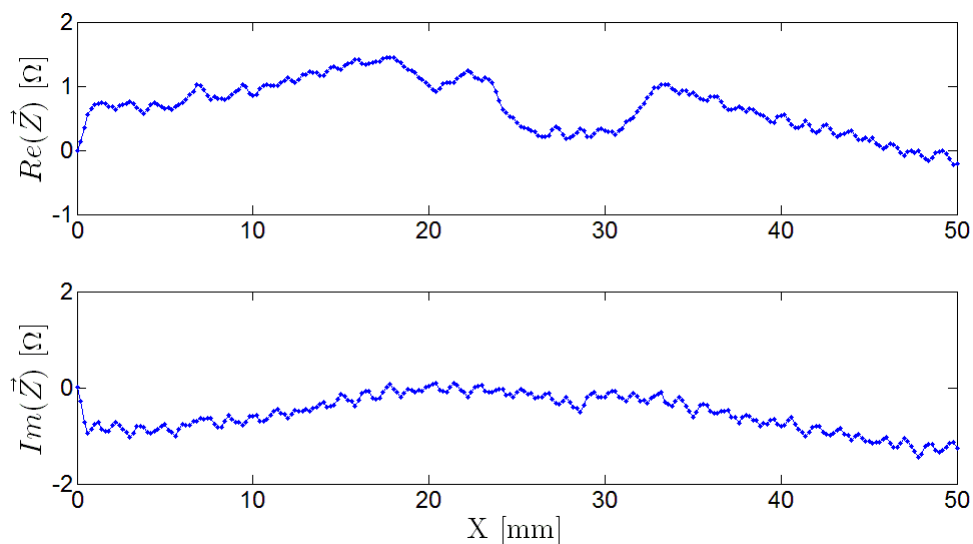


Figura A144 – Ensaio 1 – Defeito menor – 500 kHz – Posição 1

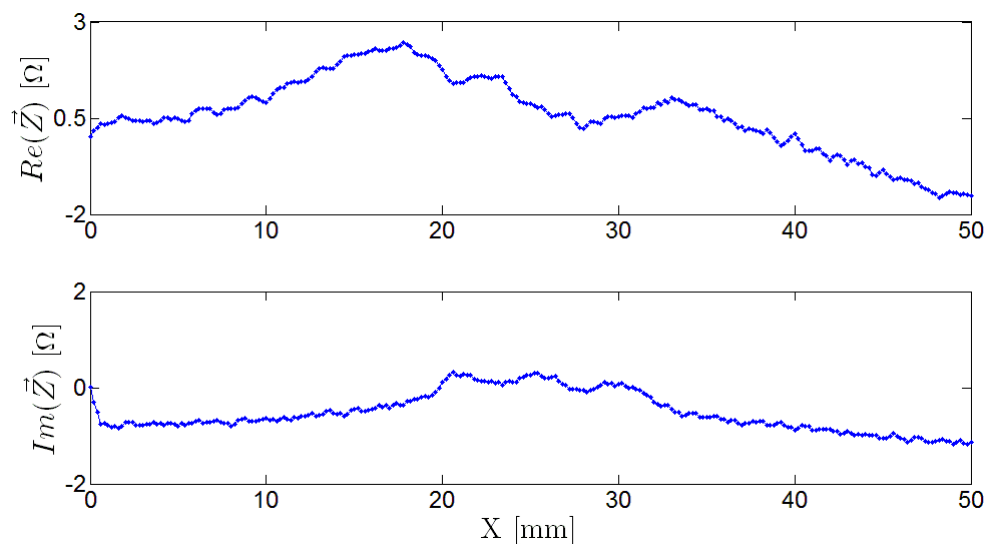


Figura A145 – Ensaio 2 – Defeito menor – 1 MHz – Posição 1

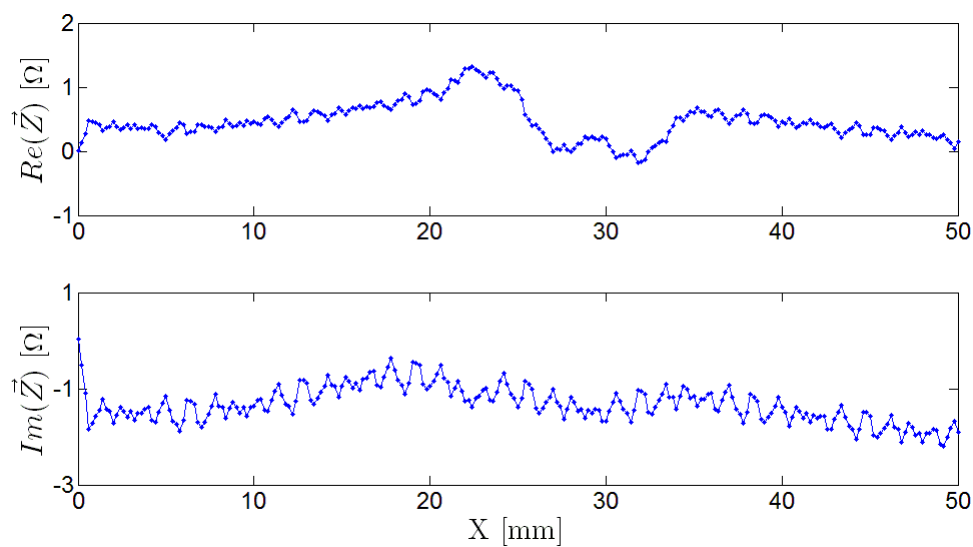


Figura A146 – Ensaio 3 – Defeito menor – 250 kHz – Posição 1

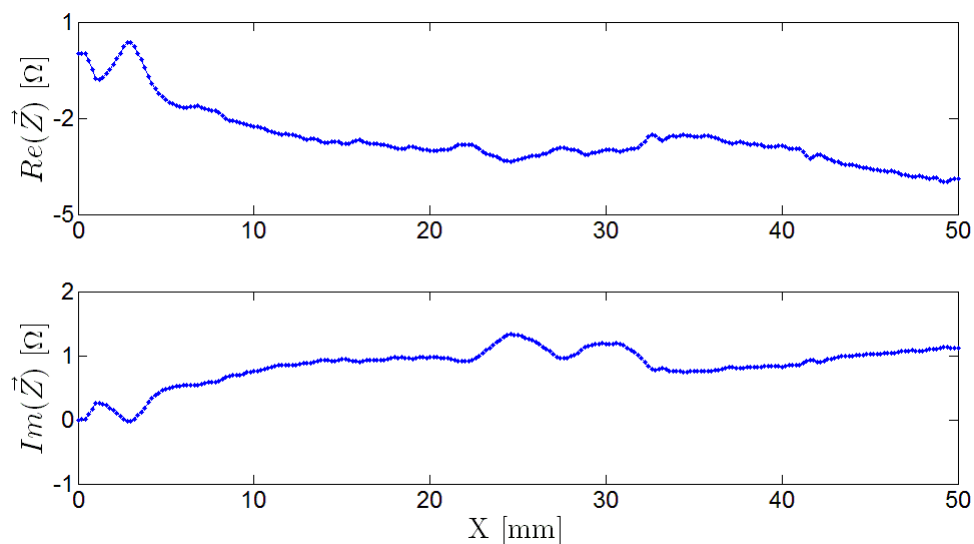


Figura A147 – Ensaio 6 – Defeito menor – 1 MHz – Posição 1

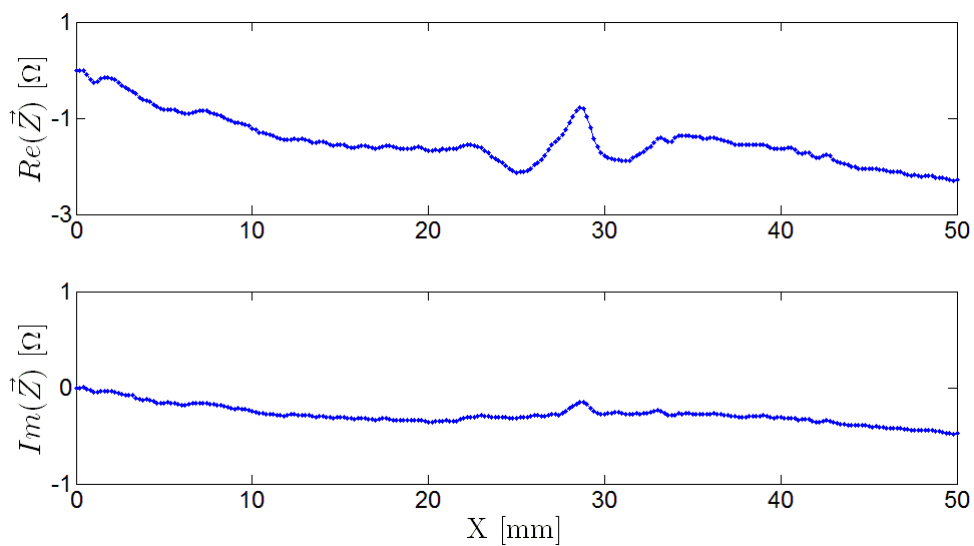


Figura A148 – Ensaio 7 – Defeito menor – 250 kHz – Posição 1

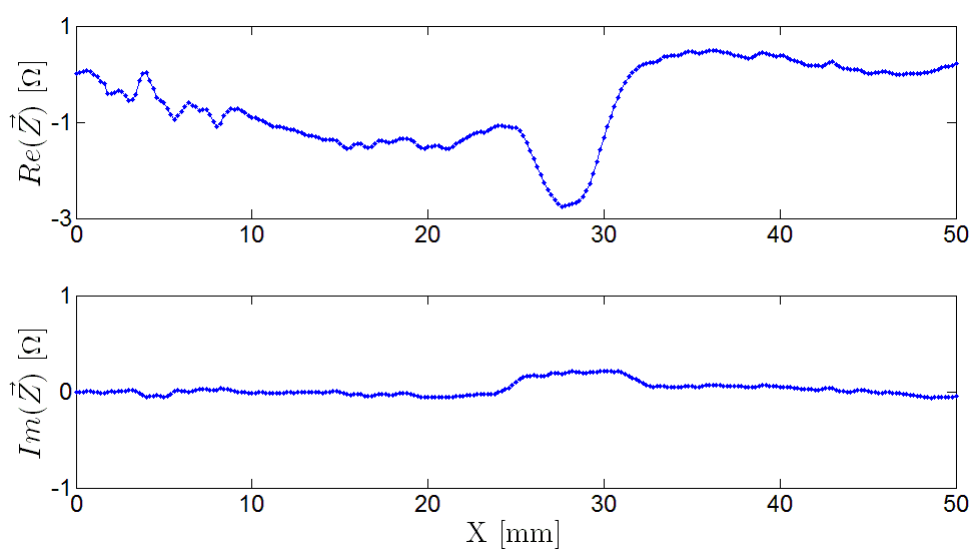


Figura A149 – Ensaio 8 – Defeito menor – 500 kHz – Posição 2

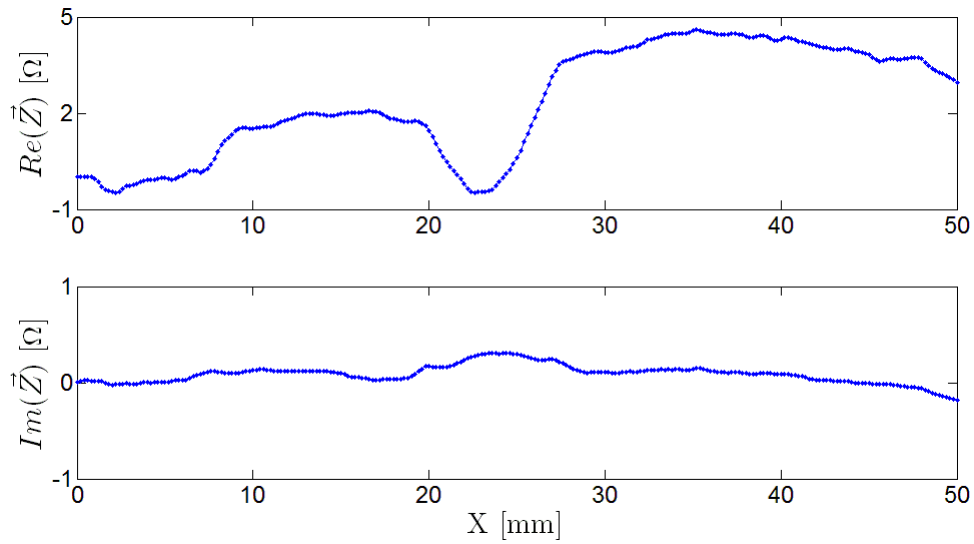


Figura A150 – Ensaio 10 – Defeito intermédio – 500 kHz – Posição 2

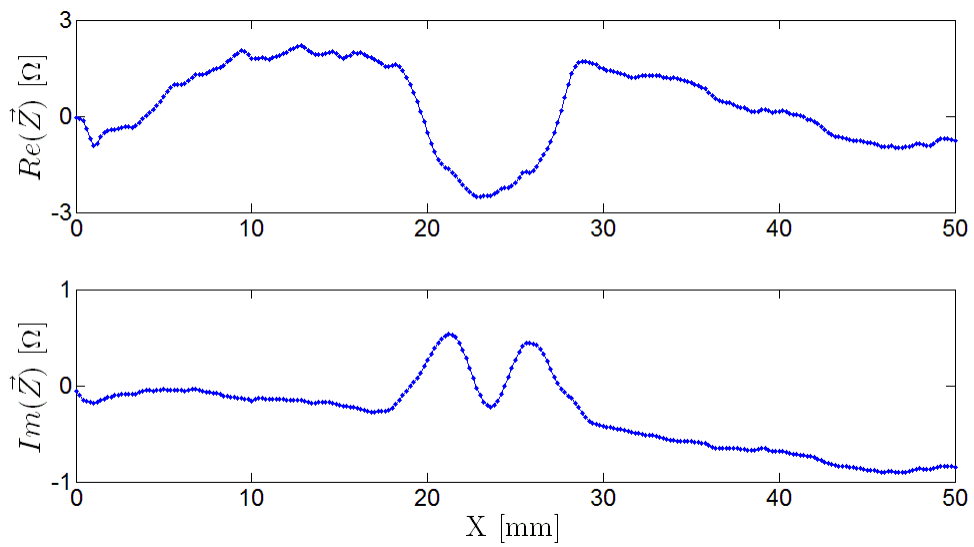


Figura A151 – Ensaio 11 – Defeito intermédio – 500 kHz – Posição 1

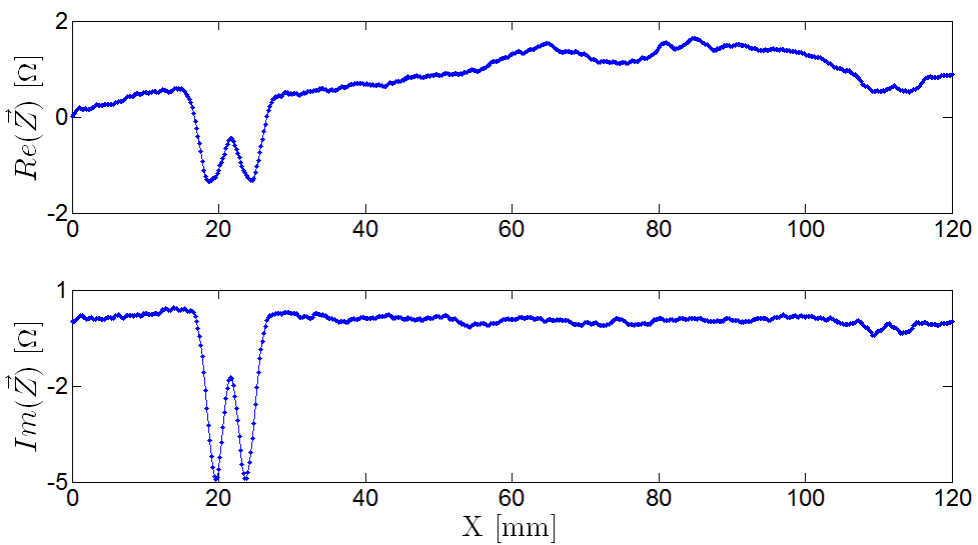


Figura A152 – Ensaio 12 – Tubo em aço ST 52 – 1 MHz – Posição 1

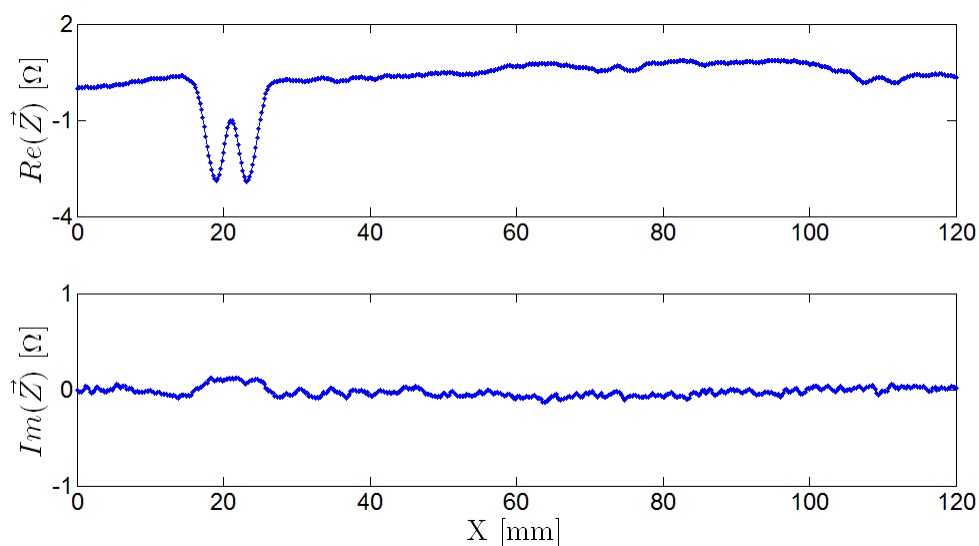


Figura A153 – Ensaio 14 – Tubo em aço ST 52 – 250 kHz – Posição 1

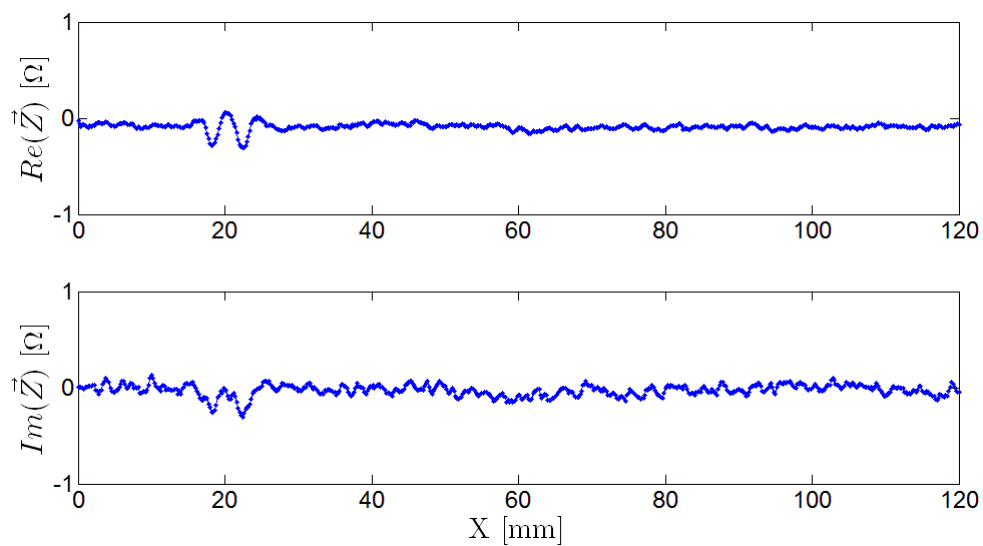


Figura A154 – Ensaio 15 – Tubo em aço ST 52 – 50 kHz – Posição 1

Anexo 16 – Resultados ensaios sonda trapezoidal vAx2x8 com excitação helicoidal 15 enrolamentos

Tabela A18 – Parâmetros dos ensaios realizados com a sonda trapezoidal vAx2x8 com excitação helicoidal

Ensaio	Frequência (kHz)	Ganho (dB)	Bobina usada	Posição	Defeito	Tubo	Figura
1	500	75	L5	1	Menor	ITER	Figura A155
2	500	75	L5	1	Intermédio	ITER	Figura A156
3	250	85	L5	1	Menor	ITER	Figura A157
4	750	80	L5	1	Menor	ITER	Figura 6.52
5	1000	80	L5	1	Menor	ITER	Figura A158
6	2500	75	L5	1	Menor	ITER	Figura A159
7	5000	70	L5	1	Menor	ITER	Figura A160
8	500	80	L5+L4	1	Menor	ITER	Figura A161
9	500	80	L5+L4	2	Menor	ITER	Figura A162
10	500	80	L5	2	Menor	ITER	Figura A163
11	500	80	L5	3	Menor	ITER	Figura A164
12	1000	55	L5	1	-	ST 52	Figura A165
13	500	60	L5	1	-	ST 52	Figura 6.54
14	250	65	L5	1	-	ST 52	Figura A166
15	50	80	L5	1	-	ST 52	Figura A167

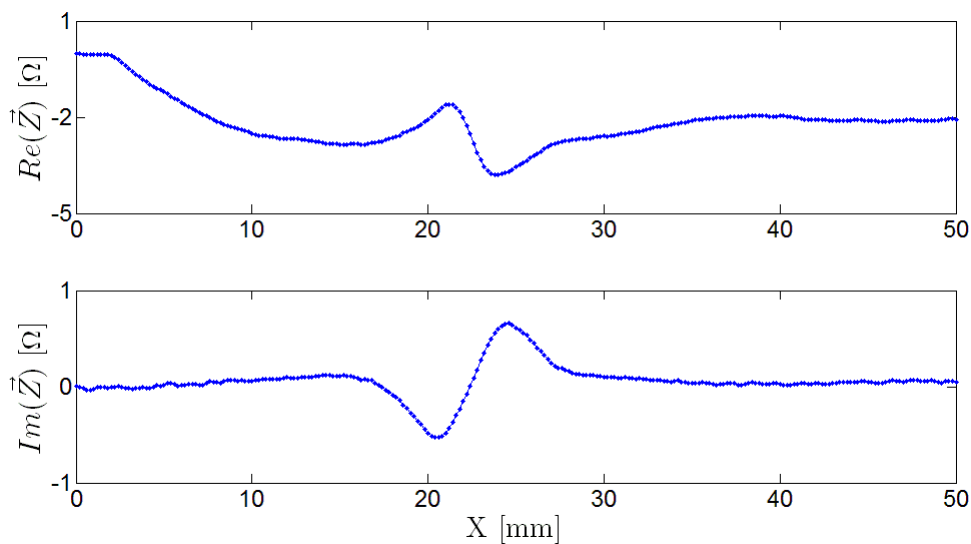


Figura A155 – Ensaio 1 – Defeito menor – 500 kHz – Posição 1

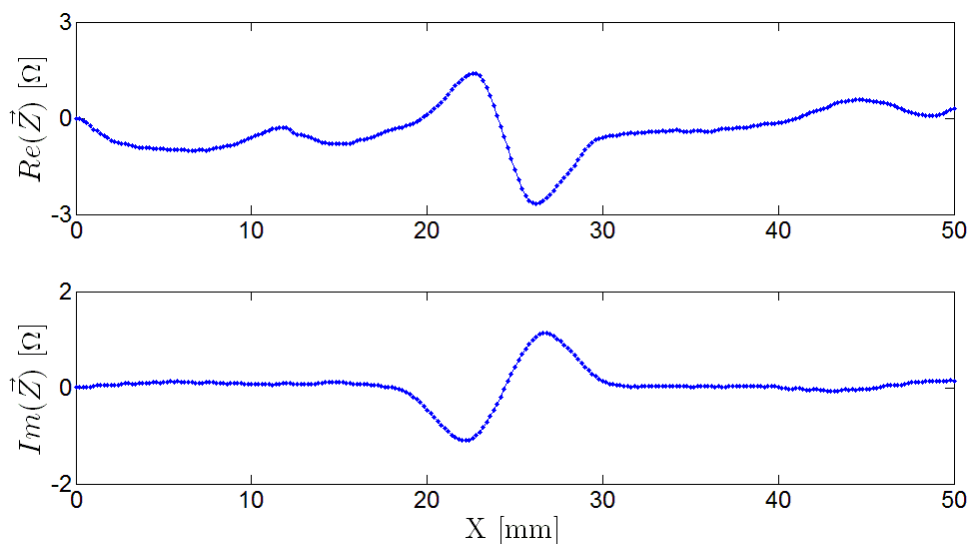


Figura A156 – Ensaio 2 – Defeito intermédio – 500 kHz – Posição 1

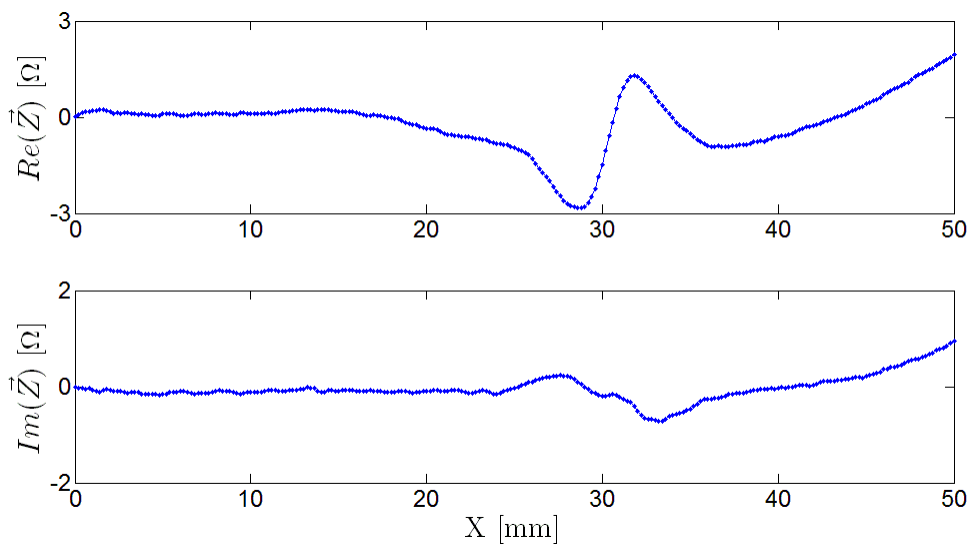


Figura A157 – Ensaio 3 – Defeito menor – 250 kHz – Posição 1

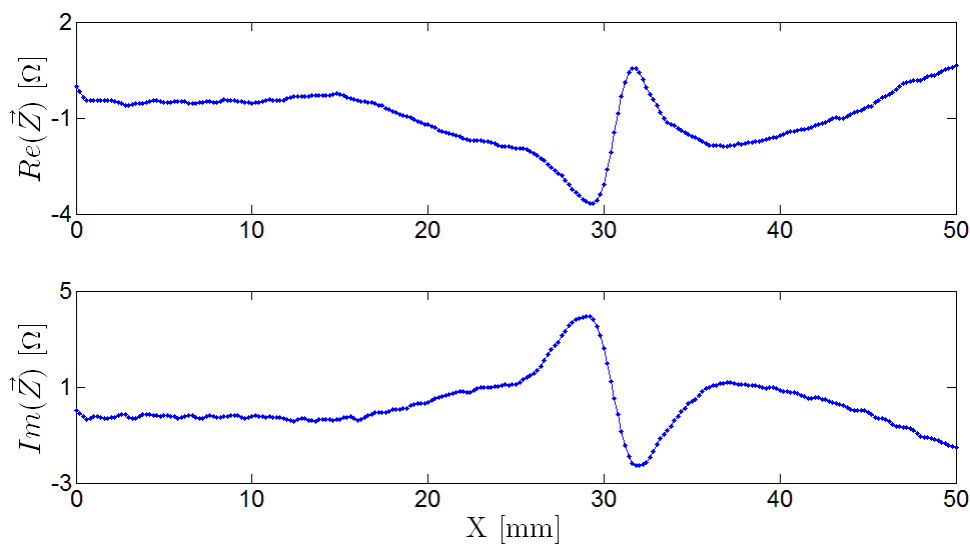


Figura A158 – Ensaio 5 – Defeito menor – 1 MHz – Posição 1

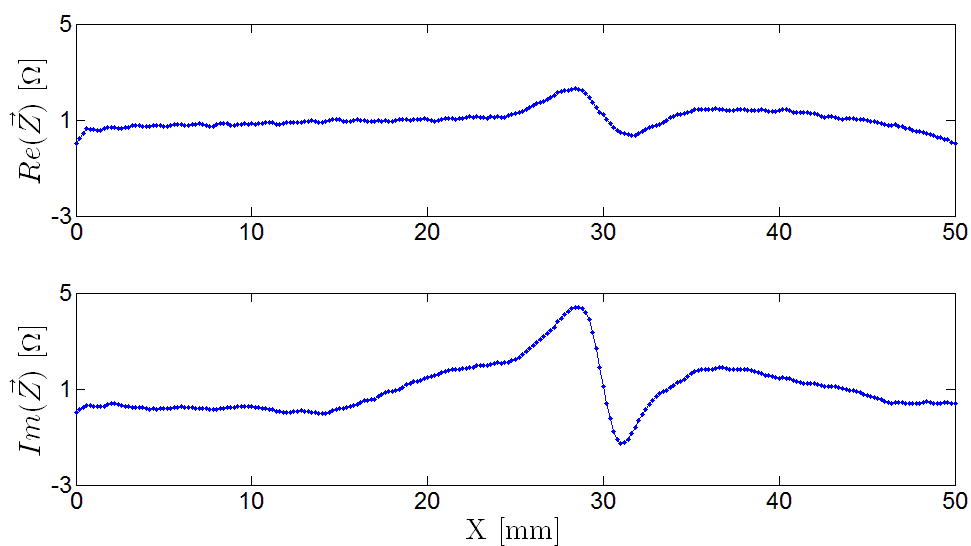


Figura A159 – Ensaio 6 – Defeito menor – 2,5 MHz – Posição 1

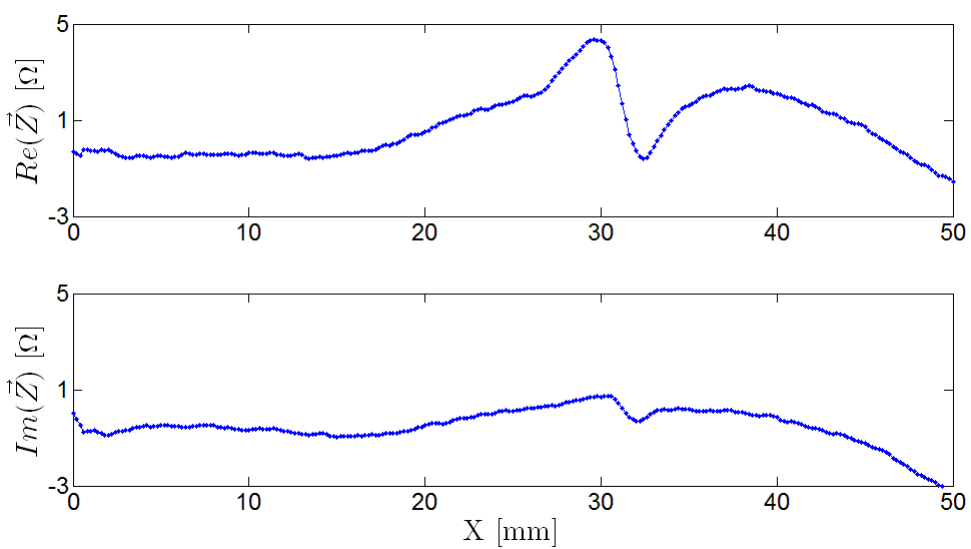


Figura A160 – Ensaio 7 – Defeito menor – 5 MHz – Posição 1

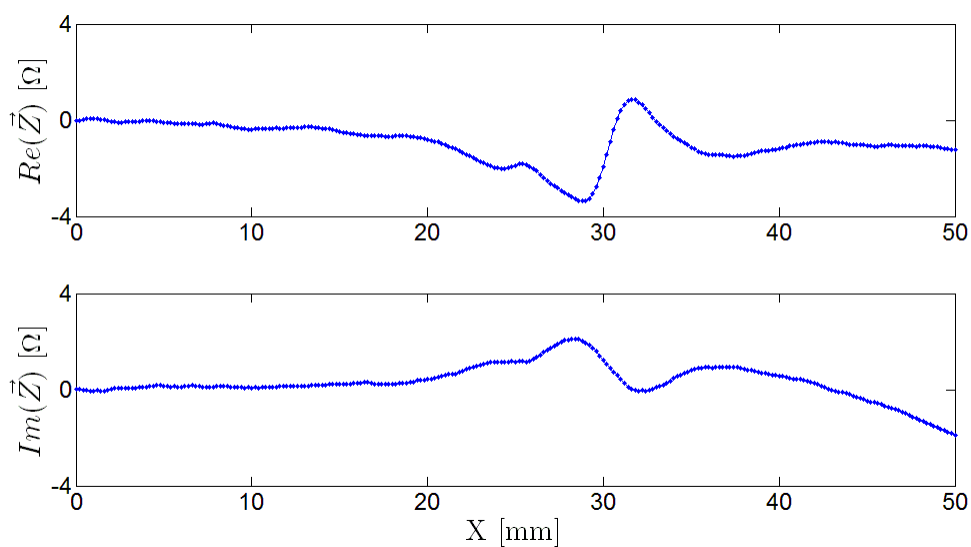


Figura A161 – Ensaio 8 – Defeito menor – 500 kHz – Posição 1

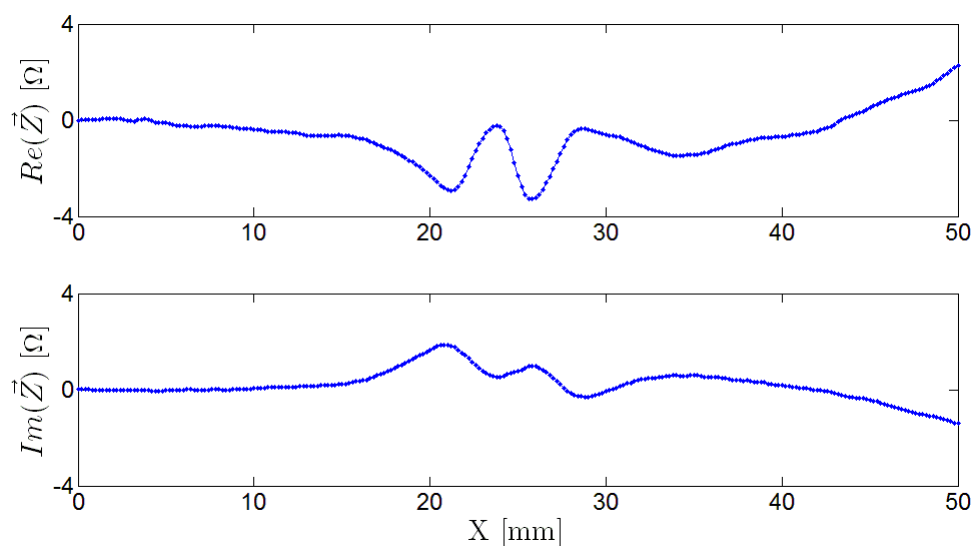


Figura A162 – Ensaio 9 – Defeito menor – 500 kHz – Posição 2

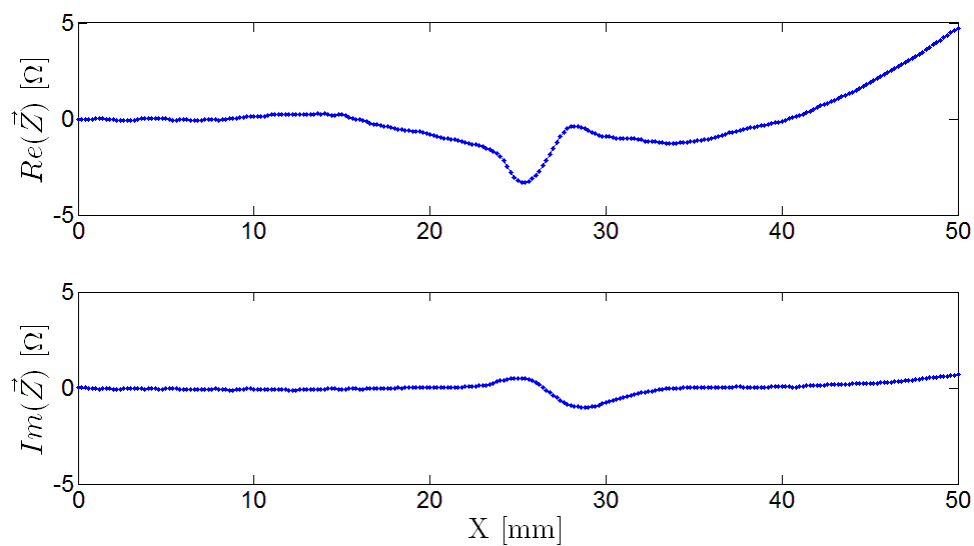


Figura A163 – Ensaio 10 – Defeito menor – 500 kHz – Posição 2

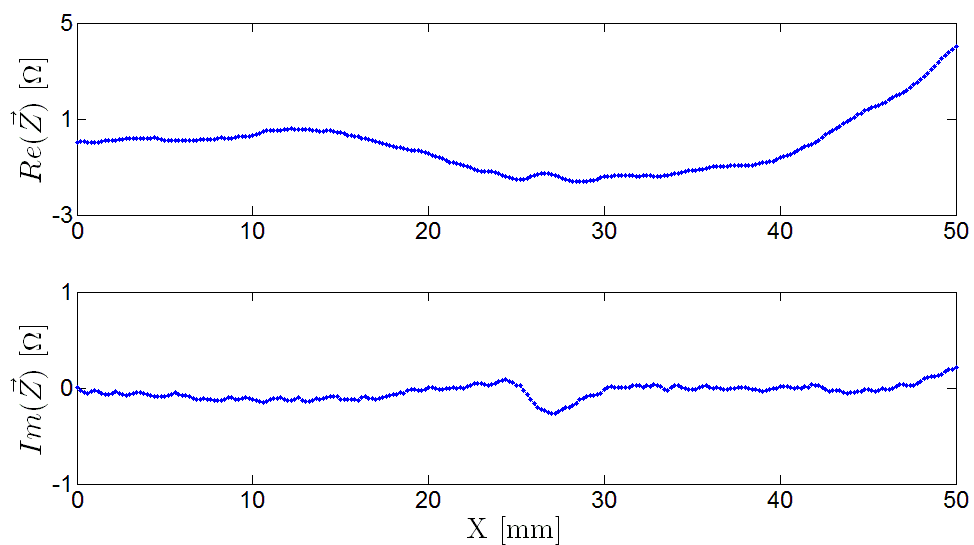


Figura A164 – Ensaio 11 – Defeito menor – 500 kHz – Posição 3

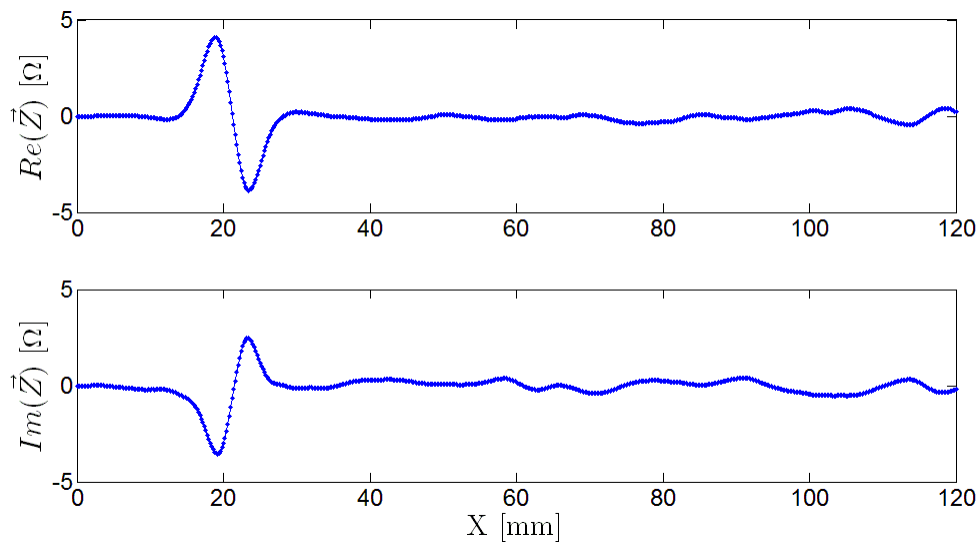


Figura A165 – Ensaio 12 – Tubo em aço ST 52 – 1 MHz – Posição 1

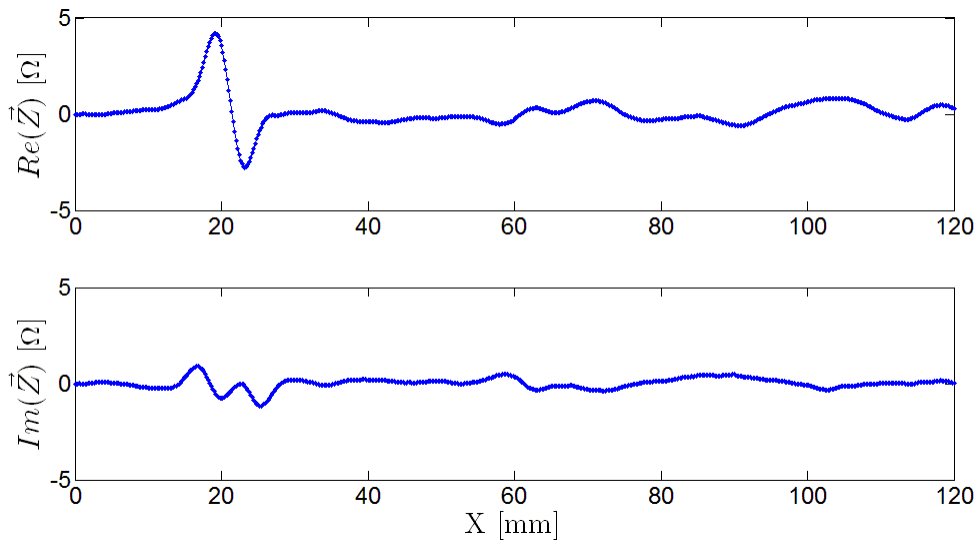


Figura A166 – Ensaio 14 – Tubo em aço ST 52 – 250 kHz – Posição 1

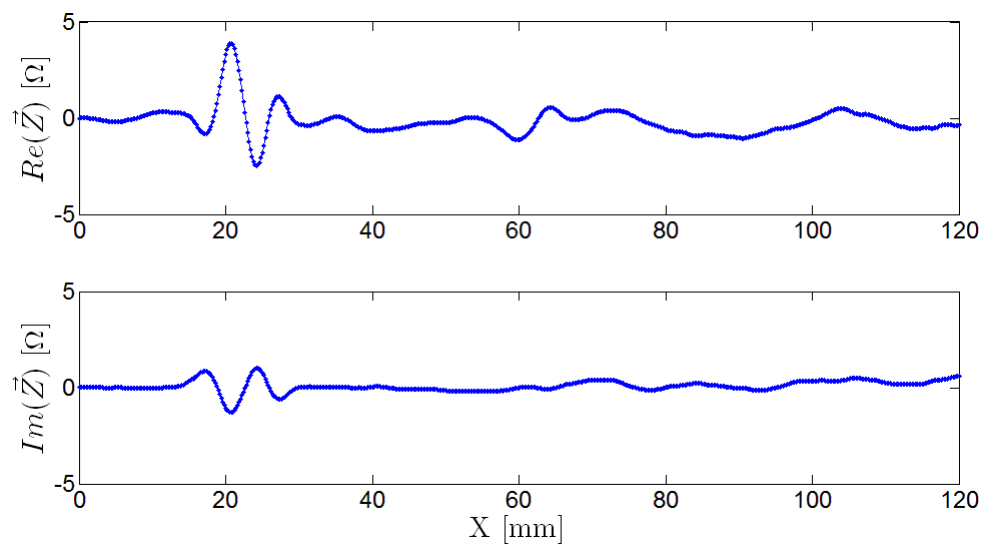


Figura A167 – Ensaio 15 – Tubo em aço ST 52 – 50 kHz – Posição 1